

UNIVERSIDAD DE COSTA RICA
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA

**ANÁLISIS TÉCNICO DE LA IMPLEMENTACIÓN DEL PROCESO
DE DECLORINACIÓN, REGENERACIÓN Y RECUPERACIÓN DEL
ACEITE DIELECTRICO CONTAMINADO CON BIFENILOS
POLICLORADOS**

Proyecto de graduación sometido a la consideración de la Escuela de
Ingeniería Química como requisito final para optar por el grado de
Licenciatura en Ingeniería Química

Luis Diego Wachong Solano

Ciudad Universitaria Rodrigo Facio
San José, Costa Rica

2015

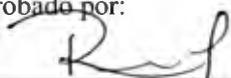
**Análisis técnico de la implementación del proceso de decloración,
regeneración y recuperación del aceite dieléctrico contaminado con
bifenilos policlorados**

Proyecto de graduación sometido a la consideración de la Escuela de Ingeniería Química
como requisito final para optar por el grado de Licenciatura en Ingeniería Química

Sustentante:

Luis Diego Wachong Solano

Aprobado por:



M.Sc. Randall Ramirez Loria

Presidente del tribunal

Profesor

Escuela de Ingeniería Química

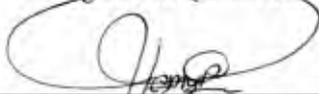


Ing. Bernardo Mora Gómez, M.Sc.

Director del proyecto

Profesor Interino

Escuela de Ingeniería Química



Ing^a. Jenny Calderón Castro

Miembro lector

Profesora Interina

Escuela de Ingeniería Química

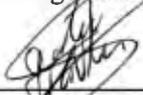


Ing. Leonardo Garro Mena, M.Sc.

Miembro lector

Profesor Interino

Escuela de Ingeniería Química



Ing. Allan Mora Vindas

Miembro invitado

Profesor Interino

Escuela de Ingeniería Química

Dedicatoria

A mis padres, que me hicieron todo lo que soy

A mis hermanos, que siempre han estado a mi lado

A mis amigos, y a toda persona que me apoyó durante este proyecto

Reconocimientos

Se agradece a La Compañía donde se realizó la práctica dirigida, y a todos los compañeros de labores que brindaron apoyo tanto intelectual como moral. La confianza depositada en mi persona y demás aportes otorgados nunca serán olvidados.

A La Empresa encargada del proyecto se le agradece todo el apoyo e información que se brindó con el fin y beneficio de todos. Se tuvieron siempre las puertas abiertas y mucha cordialidad en las visitas que se realizaron y las conversaciones que se mantuvieron durante la realización de la práctica.

Se agradece al PhD. Guy Lamoureux y la Lcda. Lorena Hernández por el apoyo otorgado durante la fase de experimentación en las instalaciones del CIPRONA. El conocimiento y apoyo recibido son invaluable, y fueron pieza fundamental para la finalización del presente trabajo de graduación.

A todos los profesores de la Universidad de Costa Rica que de una u otra manera me apoyaron, aconsejaron y/o brindaron su tiempo para evacuar las dudas que surgieron durante mi investigación, les agradeceré por siempre. Prácticamente todo el conocimiento utilizado para este trabajo provino de ellos(as), y siempre se mostraron dichosos de otorgarlo.

Finalmente, se le agradece al Alma máter, La Universidad de Costa Rica, por tantos años de apoyo al realizador de este trabajo de graduación. Los recursos que brinda esta institución a sus estudiantes y su calidad de educación son sin precedentes, y no se podría pedir por una mejor formación profesional.

Resumen

Se realizó un análisis técnico de la implementación del proceso de declorinación, regeneración y recuperación de aceite dieléctrico contaminado con bifenilos policlorados, en modalidad de práctica dirigida en una Compañía de distribución eléctrica de Costa Rica. El trabajo se realizó mediante visitas a la empresa encargada del proceso e investigación detallada de las características del proceso y los equipos asociados.

Generalmente los análisis se realizaron de manera digital, pero se requirió visitar la zona de proceso para determinar sus características y avances realizados, además de lo anterior se realizaron visitas a organizaciones tanto del estado como privadas, en busca de consultar información clave para la finalización del análisis correspondiente.

Se realizaron análisis independientes de cada aspecto importante del proceso, tales como su impacto ambiental, el riesgo ocupacional y los subprocesos de almacenamiento y transporte de materiales peligrosos. Al final se obtuvieron documentos de suma importancia para la definición y esquematización del proceso de declorinación, de manera que se pudiera establecer sus implicaciones en las instituciones relacionadas y el país.

Gracias a los análisis, investigaciones y diseños realizados en este trabajo, se pudieron establecer las características primordiales del proceso que se desea establecer en Costa Rica. Además de lo anterior se logró establecer información básica para generar informes de importancia como los planes de emergencia y seguridad ocupacional, y se recopilaron los parámetros del proceso necesarios para realizar trámites como la viabilidad ambiental ante la SETENA.

Se determinó que el proceso de declorinación permite disminuir la concentración de los bifenilos policlorados presentes en el aceite de transformador hasta un valor no detectable por los métodos de medición actuales. El proceso se realiza con sodio metálico como agente reductor en un ambiente neutro, de manera que se producen residuos no peligrosos y que pueden ser tratados mediante métodos convencionales para obtener sustancias que pueden disponerse en un relleno sanitario convencional. El aceite es recuperable luego de pasar por un proceso de regeneración, el cual consiste en un sistema de adsorción de impurezas y otro de incorporación de aditivos. Lo anterior implica que el proceso permite tanto la eliminación de sustancias peligrosas como la reutilización del aceite dieléctrico luego de que su vida útil se ha visto mermada.

Se recomienda la realización de un análisis básico de costos para comparar el aceite dieléctrico procesado y el que se compra nuevo. Lo anterior de manera que se pueda definir los beneficios adicionales que puede brindar el tratamiento de los aceites contaminados, aparte del cumplimiento de las leyes relacionadas y el tratamiento responsable de los desechos peligrosos.

Índice General

Resumen.....	iii
Índice General.....	iv
Índice de Cuadros.....	xii
Índice de Figuras.....	xiv
1. CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN.....	1
2. CAPÍTULO II: ANTECEDENTES.....	3
2.1. Bifenilos policlorados.....	3
2.1.1. Historia.....	3
2.1.2. Propiedades físicas y químicas.....	3
2.1.3. Características toxicológicas y de persistencia.....	4
2.1.3.1. Subproductos de dioxinas y furanos.....	4
2.1.4. Tratamiento y disposición de bifenilos policlorados.....	4
2.2. Transformadores eléctricos.....	5
2.2.1. Aceite dieléctrico.....	6
2.2.1.1. Oxidación del aceite dentro del transformador.....	6
2.3. Aceites contaminados con bifenilos policlorados.....	7
2.3.1. Consecuencias de fugas o derrames de aceites contaminados.....	7
2.3.2. Procesos de tratamiento de aceites contaminados con bifenilos policlorados.....	8
2.3.2.1. Incineración.....	8
2.3.2.2. Declorinación química con metales alcalinos.....	8
2.3.2.2.1. Dispersiones de sodio.....	9
2.3.2.3. Sistemas de tratamiento y regeneración de aceite dieléctrico.....	10
2.3.2.4. Biorremediación.....	10
2.3.3. Procesos de tratamiento de transformadores con bifenilos policlorados.....	10
2.3.3.1. Retrolenado.....	11
2.3.3.2. Extracción por solvente.....	11
3. CAPÍTULO III: ESTUDIO DE TRAMITOLOGÍA.....	13
3.1. Convenios y reglamentación de carácter internacional.....	13

3.1.1. Convenio de Estocolmo sobre Contaminantes Orgánicos Persistentes.....	13
3.1.1.1. Generalidades.....	13
3.1.1.2. Análisis del convenio.....	13
3.1.2. Convenio de Basilea sobre el control de los movimientos transfronterizos de los desechos peligrosos y su eliminación.....	15
3.2. Leyes y reglamentación vigente en Costa Rica.....	17
3.2.1. Ley Orgánica (8412) Del Colegio De Ingenieros Químicos y Profesionales Afines...	17
3.2.1.1. Análisis del reglamento para la confección y tramite de planos del Colegio de Ingenieros Químicos y Profesionales Afines.....	18
3.2.2. Reglamento 11492-SPPS de Higiene Industrial.....	19
3.2.3. Reglamento de permiso de funcionamiento del Ministerio de Salud.....	19
3.2.4. Reglamento general de seguridad e higiene en el trabajo.....	19
3.2.5. Viabilidad Ambiental otorgada por la SETENA.....	20
4. CAPÍTULO IV: ANÁLISIS DE LOS SITIOS DE ALMACENAMIENTO DE TRASFORMADORES CON ACEITE CONTAMINADO.....	21
4.1. Almacenamiento de aceites contaminados.....	21
4.2. Análisis de visita a los planteles de La Compañía.....	22
4.2.1. Sub-plantel Desamparados.....	22
4.2.1.1. Condiciones para transporte a planta de tratamiento y regeneración.....	28
4.2.2. Plantel San Rafael.....	29
4.2.2.1. Condiciones para transporte a planta de tratamiento y regeneración.....	34
4.2.3. Plantel Hatillo.....	35
4.2.3.1. Condiciones para transporte a planta de tratamiento y regeneración.....	40
5. CAPÍTULO V: ANÁLISIS DEL TRANSPORTE DE LOS ACEITES CONTAMINADOS	43
5.1. Capacidad de transporte de la Empresa.....	43
5.1.1. Conocimientos y habilidades requeridos del conductor.....	43
5.2. Análisis de la legislación nacional para el transporte de sustancias peligrosas.....	43
5.2.1. Documentos necesarios para el transporte.....	43

5.2.1.1. Ficha de emergencia para el transporte de materiales peligrosos.....	43
5.2.1.2. Permiso de Pesos y Dimensiones otorgado por Consejo Nacional de Viabilidad.....	44
5.2.1.3. Revisión técnica vehicular.....	44
5.2.1.4. Autorización de La Contraloría del Ambiente del MINAE.....	44
5.2.1.5. Manifiesto para el transporte de desechos peligrosos.....	44
5.2.2. Requisitos físicos necesarios para el transporte de sustancias peligrosas.....	44
5.2.2.1. Placa de rombo de identificación.....	45
5.2.2.2. Placas con número de riesgo y código de identificación del material.....	45
5.3. Atención de emergencias.....	46
5.3.1. Aceite contaminado con bifenilos policlorados.....	47
5.3.2. Dispersión de sodio metálico en aceite mineral.....	49
5.4. Sustancias peligrosas a transportar.....	51
5.4.1. Aceite contaminado con bifenilos policlorados.....	52
5.4.2. Materiales contaminados con bifenilos policlorados.....	53
5.4.3. Dispersión de sodio metálico.....	53
5.5. Análisis de embalaje, carga y descarga.....	53
5.5.1. Capacidad volumétrica de carga y tonelaje de los automotores.....	53
5.5.1.1. Camión modelo Toyota Dyna®.....	54
5.5.1.2. Camión modelo International 4300®.....	54
5.5.2. Transporte de transformadores y demás contenedores de aceite contaminado.....	54
5.5.3. Contenedores con dispersión de sodio.....	57
5.5.4. Embalaje.....	57
5.6. Definición de las rutas permitidas.....	58
5.6.1. Ruta de plantel San Rafael a empresa encargada del proceso.....	58
5.6.2. Ruta de sub-plantel Desamparados a empresa encargada del proceso.....	59
5.6.3. Ruta de plantel Hatillo a empresa encargada del proceso.....	59
5.6.4. Ruta de sub-plantel Guadalupe a empresa encargada del proceso.....	59

6. CAPÍTULO VI: ANÁLISIS DEL PROCESO DE DECLORINACIÓN Y REGENERACIÓN DEL ACEITE DIELECTRICO.....	61
6.1. Proceso de declorinación del aceite.....	61
6.1.1. Reactivos.....	61
6.1.1.1. Aceite contaminado.....	61
6.1.1.1.1. Análisis de composición química del aceite dieléctrico.....	62
6.1.1.2. Reactivo de sodio metálico.....	67
6.1.2. Productos.....	67
6.1.2.1. Cloruro de sodio.....	68
6.1.2.2. Residuos no saponificables.....	68
6.1.2.3. Hidróxido de sodio.....	68
6.1.2.4. Ésteres de ácidos grasos.....	69
6.1.2.5. Sodio saponificado.....	70
6.1.2.5.1. Saponificación.....	70
6.1.2.6. Carbonato de sodio.....	71
6.1.2.7. Asfaltos y alquitranes.....	72
6.1.3. Reacción de declorinación.....	73
6.1.3.1. Posibles mecanismos de la reacción de Wurtz.....	73
6.1.3.1.1. Mecanismo vía organometálicos.....	73
6.1.3.1.2. Mecanismo vía radicales libres.....	74
6.1.4. Balances de materia.....	75
6.2. Proceso de regeneración del aceite.....	76
6.2.1. Sistema de torres de adsorción.....	77
6.2.1.1. Tierras Fuller.....	78
6.2.2. Procesamiento térmico.....	79
6.2.3. Procesamiento de reincorporación de aditivos.....	79
6.2.3.1. Antioxidantes.....	80
6.2.3.2. Anticorrosivos.....	81
6.2.3.3. Aditivos complementarios.....	81

6.2.3.3.1. Aditivos para el control de contaminación y sólidos depositados.....	82
6.2.3.3.2. Aditivos para prevenir la formación de lodos y esmaltes.....	82
6.2.3.3.3. Aditivos de inhibición de espuma.....	82
6.3. Análisis de los equipos.....	83
6.3.1. Tanque de dispersión de sodio (V-101).....	83
6.3.1.1. Sistema de control y seguridad del tanque de dispersión.....	84
6.3.2. Desgasificador.....	84
6.3.2.1. Sistema de control y seguridad del desgasificador.....	85
6.3.3. Tanques de declorinación (R-100).....	85
6.3.3.1. Sistema de control y seguridad de los tanques de reacción.....	86
6.3.4. Centrífuga (S-101).....	86
6.3.4.1. Sistema de control y seguridad de la centrífuga.....	87
6.3.5. Torres de absorción de Tierras Fuller.....	87
6.3.3.1. Sistema de control y seguridad de las torres de Tierras Fuller.....	87
7. CAPÍTULO VII: ANÁLISIS DEL TRATAMIENTO DE LOS RESIDUOS.....	89
7.1. Análisis y caracterización de los residuos.....	89
7.1.1. Aceite descontaminado.....	89
7.1.2. Cloruro de sodio.....	90
7.1.3. Hidróxido de sodio.....	90
7.1.4. Carbonato de sodio.....	90
7.1.5. Ésteres de ácidos grasos.....	91
7.1.6. Sodio saponificado.....	92
7.1.7. Residuos no saponificables.....	92
7.1.8. Asfaltos y alquitranes.....	94
7.2. Tramitología asociada al tratamiento y disposición final de residuos sólidos y líquidos..	94
7.3. Clasificación preliminar y peligrosidad de los residuos.....	95

7.4. Separación de los residuos.....	97
7.4.1. Separación primaria: Centrifugación.....	97
7.4.1.1. Fase aceitosa.....	98
7.4.1.2. Fase acuosa.....	98
7.4.1.3. Fase pesada.....	99
7.4.2. Separación secundaria.....	99
7.4.2.1. Separación de fase aceitosa.....	99
7.4.2.2. Separación de fase acuosa.....	100
7.4.2.3. Separación de fase pesada.....	100
7.5. Tratamiento y disposición final.....	100
7.5.1. Aceite dieléctrico.....	100
7.5.2. Ésteres de ácidos grasos.....	101
7.5.3. Hidróxido de sodio.....	101
7.5.4. Sales de sodio.....	102
7.5.5. Carbonato de sodio.....	102
7.5.6. Cloruro de sodio.....	103
7.5.7. Residuos sólidos.....	103
7.6. Diseño de equipos para los tratamientos.....	104
7.6.1. Reactor primario.....	105
7.6.2. Lechos de evaporación de cloruro de sodio.....	107
7.6.3. Sistema combinado de evaporación.....	112
8. CAPÍTULO VIII: ANÁLISIS DE IMPACTO AMBIENTAL.....	115
8.1. Introducción.....	115
8.2. Método de análisis de impacto ambiental.....	115
8.3. Aspecto ambientales.....	118
8.3.1. Etapa constructiva y de remodelación.....	119
8.3.1.1. Medidas de control y/o compensativas.....	120

8.3.2. Generación de residuos sólidos en el tratamiento de los transformadores.....	121
8.3.2.1. Medidas de mitigación.....	122
8.3.3. Salida de gases a través de la ventila atmosférica.....	123
8.3.3.1. Caracterización de la mezcla de gases.....	123
8.3.3.2. Equipos.....	123
8.3.3.3. Medidas de control y compensación.....	125
8.3.4. Salida de gases y vapores del desgasificador.....	126
8.3.5. Generación de aguas residuales en la centrífuga.....	127
8.3.5.1. Medidas correctivas o de compensación.....	128
8.3.6. Generación de residuos sólidos en los filtros del desgasificador.....	128
8.3.6.1. Medidas de control y compensación.....	130
8.3.7. Torres de adsorción empacadas con Tierras Fuller.....	130
8.3.7.1. Medidas de compensación o correctivas.....	132
8.3.8. Generación de residuos sólidos debido a las tareas de limpieza y tratamiento de derrames.....	132
8.3.8.1. Medidas de mitigación.....	133
9. CAPÍTULO IX: ANÁLISIS DE RIESGO.....	135
9.1. Análisis de riesgo de tipo ocupacional.....	135
9.1.1. Método de evaluación de riesgo ocupacional.....	135
9.1.1.1. Consecuencia del daño.....	136
9.1.1.2. probabilidad de ocurrencia del daño.....	137
9.1.1.3. Valoración de riesgo.....	137
9.1.2. Factores de riesgo.....	139
9.1.2.1. Zona de almacenamiento de los transformadores contaminados.....	139
9.1.2.1.1. Carga y descarga de contenedores.....	139
9.1.2.1.2. Almacenamiento y riesgo de incendio.....	139
9.1.2.1.3. Medidas de mitigación.....	140
9.1.2.2. Almacenamiento y manipulación del reactivo de sodio.....	140
9.1.2.3. Sistema de declorinación química.....	141

9.1.2.4. Sistema de regeneración de aceite.....	143
9.1.2.5. Tratamiento de emergencias.....	144
9.1.3. Observaciones y recomendaciones generales hacia la empresa.....	145
9.2. Análisis de riesgo de tipo operacional.....	145
9.2.1. Análisis HAZOP.....	146
9.2.2. Evaluación de riesgo de proceso.....	148
9.2.2.1. Sistema de inyección de nitrógeno.....	148
9.2.2.2. Sistema de distribución de sodio metálico.....	149
9.2.2.3. Sistema de tanques de reacción.....	150
9.2.2.4. Centrífuga de lavado del aceite dieléctrico.....	152
9.2.2.5. Desgasificador de aceite dieléctrico.....	153
9.2.2.6. Sistema de regeneración del aceite dieléctrico.....	155
9.2.3. Conclusiones generales del análisis HAZOP.....	155
10. CAPÍTULO X: ANÁLISIS DE LA PRÁCTICA DIRIGIDA.....	157
10.1. Facilidades y oportunidades.....	157
10.2. Obstáculos y dificultades.....	158
10.3. Resultados obtenidos y conclusiones de los análisis.....	158
NOMENCLATURA.....	161
BIBLIOGRAFÍA.....	163
ANEXO 1: D1 del proyecto en estudio.....	171
ANEXO 2: Diagrama de flujo del proceso de declorinación y regeneración del aceite dieléctrico contaminado con PCB's.....	181

Índice de Cuadros

Cuadro 5.1. Código de Peligrosidad de los Residuos y demás sustancias químicas.....	46
Cuadro 5.2. Inventario de los transformadores eléctricos con aceite contaminado con PCB's	52
Cuadro 5.3. Volumen de aceite para los transformadores de potencia y equivalente de barriles.....	52
Cuadro 5.4. Constantes para la relación empírica de dimensionamiento de los transformadores.....	55
Cuadro 5.5. Constantes obtenidas por método spline cúbico para los transformadores de 5 y 37,5 kilovatios.....	55
Cuadro 5.6. Cantidad de transformadores por tarimas y cantidad total de tarimas necesarias	56
Cuadro 5.7. Cantidad de transformadores libres y su distribución en las tarimas de transporte.....	56
Cuadro 5.8. Cálculo de la cantidad de viajes necesarios para ambos casos en estudio.....	57
Cuadro 6.1. Análisis de componentes de la muestra de aceite para el sistema GC-MS.....	65
Cuadro 6.2. Compuestos determinados por análisis GC-MS para la muestra de aceite.....	66
Cuadro 6.3. Productos de la reacción de dechlorinación y su proporción másica.....	75
Cuadro 6.4. Propiedades físico-químicas y eléctricas solicitadas para el aceite regenerado....	77
Cuadro 6.5 Variación de las propiedades del aceite descontaminado luego del tratamiento con Tierras Fuller.....	78
Cuadro 7.1. Punto de fusión y densidad de algunos ésteres de ácidos grasos etilo sustituidos	91
Cuadro 7.2. Caracterización de los componentes mayoritarios de los residuos no saponificables.....	93
Cuadro 7.3. Límites máximos para los parámetros del agua residual según el Reglamento Nacional.....	94
Cuadro 7.4. Residuos del proceso que pueden verterse en rellenos sanitarios regulares.....	96
Cuadro 7.5. Resumen de la caracterización de los residuos del proceso de dechlorinación.....	97
Cuadro 7.6. Dimensiones del tanque primarios y sus accesorios.....	105
Cuadro 7.7. Condiciones climatológicas de la zona de Cartago de Enero a Octubre del 2014	108
Cuadro 8.1 Términos que califican la importancia de un efecto y su caracterización.....	116
Cuadro 8.2 Caracterización de la importancia del efecto y su impacto ambiental.....	118

Cuadro 8.3. Origen y peligrosidad asociada a los residuos del tratamiento con Tierras Fuller	130
Cuadro 9.1. Nivel de exposición o de severidad del riesgo.....	138
Cuadro 9.2. Análisis de riesgo para el almacenamiento de los contenedores de aceite contaminado.....	140
Cuadro 9.3. Análisis de riesgo para el almacenamiento del reactivo de sodio.....	141
Cuadro 9.4. Análisis de riesgo para el sistema de dechlorinación química.....	143
Cuadro 9.5. Análisis de riesgo para el sistema de regeneración del aceite.....	144
Cuadro 9.6. Análisis de riesgo para el tratamiento de emergencias.....	145
Cuadro 9.7. Palabras guía comúnmente utilizadas para un análisis HAZOP.....	146
Cuadro 9.8. Segmento de un análisis HAZOP para un sistema de reacción por lotes.....	147
Cuadro 9.9. Análisis HAZOP para el sistema de inyección de nitrógeno.....	149
Cuadro 9.10. Análisis HAZOP para el sistema de distribución de sodio metálico.....	150
Cuadro 9.11. Análisis HAZOP para el sistema de tanques de reacción.....	151
Cuadro 9.12. Análisis HAZOP para la centrífuga de lavado del aceite dieléctrico.....	153
Cuadro 9.13. Análisis HAZOP para el desgasificador de aceite dieléctrico.....	154
Cuadro 9.14. Análisis HAZOP para el sistema de regeneración del aceite dieléctrico.....	155

Índice de Figuras

Figura 4.1. Almacenamiento de los transformadores y barriles con aceite contaminado.....	23
Figura 4.2. Disposición de la lona en el plantel Desamparados.....	24
Figura 4.3. Agujeros formados por estancamiento del agua llovida sobre la lona de protección.....	24
Figura 4.4. Techo de “Tijeras” para el estancamiento del agua sobre la lona.....	25
Figura 4.5. Etiqueta de características y riesgos presente en la lona de protección.....	26
Figura 4.6. Cercanía del alcantarillado respecto al lugar de almacenamiento.....	27
Figura 4.7. Ejemplificación de la cercanía de la zona de almacenamiento a las zonas pobladas.....	28
Figura 4.8. Disposición espacial de los contenedores de aceite contaminado en las bodegas	29
Figura 4.9. Condiciones de control de riesgo en las bodegas del plantel de San Rafael.....	30
Figura 4.10. Disposición del nivel de suelo de las bodegas.....	31
Figura 4.11. Posición de la bodega respecto al terreno contiguo.....	31
Figura 4.12. Bodega de cilindros que contienen acetileno y LPG.....	32
Figura 4.13. Sistema de atención de derrames.....	33
Figura 4.14. Calle del plantel que conduce hacia las bodegas de PCB’s.....	34
Figura 4.15. Cercanía de los transformadores contaminados con la vía pública.....	35
Figura 4.16. Estado de las cercas de protección del plantel Hatillo.....	37
Figura 4.17. Condiciones del plantel Hatillo respecto a suelos y mantenimiento.....	38
Figura 4.18. Utilización de maquinaria pesada cerca de un transformador contaminado.....	39
Figura 4.19. Transporte de un transformador de potencia por vía pública.....	41
Figura 4.20. Disposición de la base de los transformadores de potencia.....	41
Figura 5.1. Rotulación aprobada por la ONU para el transporte de sustancias peligrosas.....	45
Figura 5.2. Rotulación de transporte con el número de identificación de las Naciones Unidas y del riesgo inherente a la sustancia.....	45
Figura 5.3. Simbología ONU para el aceite contaminado con bifenilos policlorados.....	47
Figura 5.4. Simbología ONU para el sodio metálico en dispersión de aceite mineral.....	50
Figura 5.5. Dimensionamiento de un transformador eléctrico para embalaje.....	55

Figura 6.1. Espectro de masas para el pentano.....	63
Figura 6.2. Cromatograma GC-MS para un aceite mineral.....	63
Figura 6.3. Cromatograma del aceite obtenido en el sistema GC-MS del CIPRONA.....	64
Figura 6.4. Cromatograma de aceite dieléctrico libre de PCB's.....	64
Figura 6.5. Estructura molecular del ácido palmítico.....	69
Figura 6.6. Estructura molecular de un éster de ácido graso.....	69
Figura 6.7. Reacción de saponificación del benzoato de metilo.....	70
Figura 6.8. Reacción de declorinación de un bifenilo diclorado con sodio metálico.....	73
Figura 6.9. Mecanismo vía organometálicos para la reacción de declorinación.....	74
Figura 6.10. Mecanismo vía radicales libres para la reacción de declorinación.....	74
Figura 6.11. Productos de reacción provenientes del antioxidante BHT.....	80
Figura 7.1. Relación entre los números de flujo y de Reynolds para tanques agitados.....	106
Figura 8.1. Análisis de impacto ambiental para el proceso constructivo.....	120
Figura 8.2. Análisis de impacto ambiental para la generación de residuos sólidos contaminado.....	121
Figura 8.3. Análisis de impacto ambiental para la salida de gases de la ventila atmosférica....	124
Figura 8.4. Análisis de impacto ambiental para la generación de aguas residuales en la centrífuga.....	127
Figura 8.5. Análisis de impacto ambiental para la generación de residuos sólidos en los filtros.....	129
Figura 8.6. Análisis de impacto ambiental para la generación de residuos en las torres de adsorción con Tierras Fuller.....	131
Figura 8.7. Análisis de impacto ambiental para la generación de residuos sólidos por tareas de lavado y tratamiento de derrames.....	132
Figura 9.1. Matriz de valoración de riesgos.....	138
Figura 9.2. Diagrama de flujo de proceso para el sistema por lotes.....	148

CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN

Durante más de 45 años, los bifenilos policlorados (PCB's por sus siglas en inglés) han generado preocupación en la sociedad científica, debido a sus características toxicológicas, contaminantes y de persistencia (Eisler, 2012). Grandes cantidades de recursos se han destinado al estudio de estas sustancias y como disminuir su impacto en el ambiente y los seres vivos que los habitan. La presencia de los PCB's en los transformadores eléctricos generan un riesgo inminente de entrada y dispersión de estas sustancias en las zonas pobladas de nuestro país.

Debido a que en Costa Rica se ratificó en 2006 el Convenio de Estocolmo sobre contaminantes orgánicos persistentes (Ley N° 8538, 2006), se realizó un compromiso tanto legal como moral con los países firmantes de realizar las acciones necesarias para controlar y eliminar estas sustancias en el país. Se realizaron varios inventarios nacionales sobre compuestos orgánicos y se planeó un centro de almacenamiento y tratado de estos compuestos químicos, pero hasta ahora ninguna institución o empresa había realizado un proceso de eliminación de PCB's en Costa Rica.

La práctica profesional se llevó a cabo en una empresa del sector de generación y distribución de energía eléctrica, la cual solicitó confidencialidad con respecto a su nombre legal por lo que en el trabajo se mencionará solamente como 'La Compañía'. Esta Compañía cuenta con un inventario definido de transformadores eléctricos cuya concentración de bifenilos policlorados superó el valor permitido de 50 ppm.

La Compañía, que no cuenta con infraestructura ni equipos para realizar un proceso de esta índole, adjudicó la tarea a una empresa del sector de Cartago, la cual accedió a declorinar y regenerar un mínimo de 60% de los aceites y recuperar un 40% de los transformadores eléctricos. La empresa cuenta con un espacio físico limitado pero suficiente para realizar el proceso, sin embargo requiere de mejoras en infraestructura física y no cuenta con los equipos necesarios para realizar la declorinación y regeneración del aceite contaminado.

Esta empresa realizó un consorcio con una industria canadiense especializada en el tratamiento de aceites de transformador, de manera que importará los equipos diseñados por ésta con el objetivo de realizar el tratamiento en el país. Cabe destacar que esta institución encargada del proceso también solicitó un acuerdo de confidencialidad, por lo que será mencionada solamente como 'La Empresa'.

El siguiente trabajo se realizó con el fin de estudiar el proceso de declorinación y regeneración de los aceites de transformador eléctrico, analizando los aspectos que se consideraron de mayor importancia desde el punto de vista de un ingeniero químico. El análisis de un proceso industrial siempre ha sido la esencia pura de la ingeniería química, y este trabajo contempla algunos de los aspectos más representativos de esta profesión, como el análisis de riesgo, de impacto ambiental, de proceso, entre otros. En cada análisis particular se determinará el método de trabajo requerido y las herramientas que se utilizarán para realizar cada estudio.

La práctica dirigida a desarrollar brindará frutos a su realizador en términos de aprendizaje, ya que se obtendrán conocimientos importantes en todos los aspectos a considerar en un análisis de implementación de un proceso nuevo. Lo anterior implica la preparación del profesional para la realización de proyectos más complejos, y la generación de un criterio ingenieril más robusto, de manera que se puedan tomar las decisiones correctas cuando la experiencia laboral lo demande.

Además de lo anterior se recibirá una gran cantidad de experiencia laboral, tanto en resolución de problemas reales de ingeniería como la manera adecuada de relacionarse con las personas dentro del ámbito laboral. Aunado a lo anterior se pulirán habilidades de obtención de información tanto física como digital, el cumplimiento de tareas a razón de un tiempo establecido y la realización de trabajos en conjunto con otros profesionales similares.

Los beneficios otorgados a ambas instituciones asociadas al proceso será la realización de un análisis base en los aspectos más importantes de este proceso, que nunca antes ha sido realizado en el país. Con la información desarrollada en cada capítulo se podrá iniciar con la formulación de documentos de importancia como mapas de riesgo y planes de salud ocupacional, además de que se tendrá una idea generalizada de cada aspecto del proceso que debe de tomarse en cuenta. Se espera que parte de estos análisis permitan una etapa de tramitología lo más fluida posible, en especial la viabilidad ambiental de la SETENA y la aprobación de los planos en el Colegio de Ingenieros Químicos y Profesionales Afines.

Finalmente, se espera que con la realización de este trabajo, se abran las puertas en el país para este proceso tan importante en materia de descontaminación. Según (Alfaro, 2008) en el país existe una gran cantidad de empresas encargadas de la distribución eléctrica en el país, y todas cuentan con equipos posiblemente contaminados con PCB's. Es por lo anterior que la realización de este proceso convendría en la eliminación de estas sustancias de los inventarios nacionales de bifenilos policlorados.

CAPÍTULO II: ANTECEDENTES

2.1. Bifenilos policlorados

Los PCB's son compuestos químicos conformados por dos moléculas de benceno unidas por un enlace carbono-carbono, y donde al menos de uno de los hidrógenos del benceno ha sido sustituido por un átomo de cloro. Por lo mencionado anteriormente la fórmula general de los bifenilos policlorados es $C_{12}H_{10-n}Cl_n$ donde n es el número de átomos de cloro presentes en el compuesto.

2.1.1. Historia

Los bifenilos policlorados son de origen sintético, y se originaron desde 1929 a nivel industrial en usos variados como plastificantes o fluidos dieléctricos en el uso de transformadores o capacitores (García-Regueiro & Castellari, 2009). La empresa que los sintetizó primero fue la Federal Phosphorous Company junto con Swann Research Company, y la información más antigua sobre sus efectos toxicológicos se resumió en un artículo publicado en 1931 (Pfafflin & Ziegler, 2006).

Como se muestra en el Manual de manejo de PCB's para Colombia (2001) el primer caso de intoxicación por PCB's se dio en 1933 en la compañía Swann donde veintitrés trabajadores presentaron erupciones en la piel que se diagnosticaron como cloracné y algunos de ellos también sintieron lasitud. Lo anterior se le atribuyó a la compra de un nuevo reactivo de benceno, por lo que se discontinuó y además se hermetizó el sistema, de manera que se eliminó el problema del cloracné.

A través de los años se fueron descubriendo efectos de la contaminación generada por los bifenilos policlorados, como problemas genéticos en aves, concentraciones apreciables en lugares alejados de las plantas productoras y epidemias humanas como las del Yusho y Yu-Cheng. No fue sino hasta 1960 que la comunidad científica mundial los reconoció una amenaza para el ambiente y la salud humana, debido a sus efectos nocivos, persistencia y bioacumulación en los tejidos grasos y demás órganos específicos (Pfafflin & Ziegler, 2006).

2.1.2. Propiedades físicas y químicas

En general los PCB's son químicamente inertes, no polares y relativamente estables (no corrosivos, baja volatilidad, no sufren autoignición, entre otros) al ser recolectados y almacenados. Son resistentes al calor, humedad y degradación eléctrica, además de ser poco soluble en agua pero muy soluble en aceites y disolventes orgánicos. Debido a que presentan una baja volatilidad en el aire, no se propagan rápidamente en este medio, sin embargo su baja reactividad permiten que permanezca en su estado basal por mucho tiempo permitiendo que se traslade grandes distancias (Pfafflin & Ziegler, 2006).

Los bifenilos policlorados son altamente lipófilos, con diferentes grados de toxicidad dependiendo de su naturaleza química (existen un total de doscientos nueve congéneres hasta la fecha), además de que pueden absorberse en agua o suelos con una capacidad directamente proporcional al nivel de cloración de la molécula (Eisler, 2000).

Muchas de estas propiedades lo convierten en un químico industrial valioso en especial para propiedades de transferencia de calor y conductividad eléctrica, pero son estas mismas propiedades las que lo convierten en una sustancia peligrosa para el medio ambiente. El cloro hace que sean muy resistentes a la degradación natural, por lo que persisten mucho tiempo después de ser liberados y de la misma manera sus efectos toxicológicos (Proyecto CERI-ACDI-Colombia, 2001).

2.1.3. Características toxicológicas y de persistencia

Como Establece Eisler (2000) la mayor parte de la toxicidad asociada a los bifenilos policlorados se debe a sus congéneres planares y sus efectos en mamíferos y aves, como efectos adversos en el hígado, sistema inmunológico y sistema reproductivo como los más afectados. La toxicidad de cada compuesto se determina en relación al 2, 3, 7,8-TCDD, el componente más potente de esta clase de compuestos.

Los efectos toxicológicos de los PCB's en vertebrados se han relacionado con su habilidad de inducir el sistema de monooxigenasa dependiente del citocromo P-450. La hidroxilación de bifenilos es la reacción mediante la cual estos son metabolizados en el hígado, y su tasa de velocidad disminuye conforme aumenta el número de cloros enlazados a las moléculas de benceno.

Según Pfafflin y Ziegler (2006) se definen los PCB's como sustancias persistentes en el ambiente, debido a que son estables ante el calor y reacciones químicas, ligeramente soluble en agua y tienen baja volatilidad en aire. Debido a todo lo anterior, estas sustancias pueden permanecer largo tiempo en el ambiente sin ser degradadas, y transportarse grandes distancias en su estado basal.

2.1.3.1. Subproductos de dioxinas y furanos

Cuando los bifenilos policlorados se calientan hasta combustión (temperaturas de 300 a 600 Celsius aproximadamente) pueden llegar a producir dioxinas y furanos policlorados, sustancias altamente tóxicas y que producen efectos adversos en los seres vivos más rápido que los PCB's (Proyecto CERI-ACDI-Colombia, 2001). Estos subproductos son los responsables de que la disposición de los sólidos o líquidos contaminados mediante incineración deba llevar un cuidado especial en la salida de los gases para evitar la formación de estas sustancias, además de que el riesgo y consecuencias de un incendio en un transformador son mucho más graves que solo el escape de vapores de bifenilos policlorados al ambiente.

2.1.4. Tratamiento y disposición de bifenilos policlorados

Debido a su toxicidad, posibles efectos adversos y propiedades de persistencia en el medio ambiente, el tratamiento de los PCB's se ha vuelto cada vez más importante para la protección de la salud del ser humano y la vida en general. Como son compuestos orgánicos refractarios necesitan de una gran entrada de energía para realizar su descomposición por lo que uno de los métodos más utilizados es la incineración, sin embargo existen otros métodos como la biorremediación y degradación. Existen procesos tanto para el tratamiento de los aceites que contienen PCB's como para la limpieza del equipo que lo contuvo, dependiendo de las legislaciones y convenios a los que está amparada la empresa que desea realizar el tratamiento (Pfafflin & Ziegler, 2006).

2.2. Transformadores eléctricos

Según Gill (2008) son un equipo de transformación de energía que alterna un voltaje de entrada por uno de salida, a razón de su poder de transformación. El sistema consiste esencialmente en dos devanados aislados en un núcleo común de cobre. Su uso industrial más común es la conversión de voltajes en la red eléctrica de manera que se pueda transportar electricidad a altos voltajes en distancias grandes pero a su vez se pueda proporcionar un voltaje bajo para las casas de habitación.

Los transformadores son equipos muy resistentes por lo que raramente presentan problemas de operación y pueden mantenerse en funcionamiento por períodos largos de tiempo. Fallas en un transformador, aunque escasas, generalmente son de naturaleza grave, por lo que requieren de un costo de reparación elevado y un tiempo de paro apreciable. Como expone Siemens (2011) se expone que el tiempo de vida útil promedio de un transformador es de 25 a 30 años en condiciones normales de operación, sin embargo este valor depende de los costos de operación y mantenimiento del equipo, además de la temperatura y condiciones de operación.

Según Pansini (1999) se menciona que el núcleo está conformado por un material de buenas propiedades magnéticas como el hierro o el acero. Uno de los devanados recibe de una fuente de corriente alterna y es denominado devanado primario, mientras que el otro recibe energía por inductancia y es llamado devanado secundario. El paso del flujo magnético es lo que permite el cambio de voltaje de la corriente eléctrica. Otros aparatos importantes para el correcto funcionamiento del transformador son el encierro o la caja de protección, las terminales o cojinetes y el medio de aislamiento.

Harlow (2012) expone que el material sólido por excelencia utilizado para aislamiento en transformadores llenos de líquido es el material basado en la celulosa, principalmente por su bajo costo, disponibilidad y rendimiento mecánico y dieléctrico. Desde el siglo veinte se ha utilizado el papel de celulosa obtenido por el proceso de sulfatos por su alta pureza y resistencia, además de las propiedades mencionadas anteriormente.

Como menciona Gill (2008) los devanados se pueden aislar de distintas formas, ya sea utilizando aire o algún tipo de líquido donde se sumerge completamente el sistema de transformación. En el país se utilizan los transformadores del segundo tipo, utilizando generalmente aceite mineral como líquido de aislamiento y enfriado por un sistema de aletas por donde pasa el aceite y se enfría por medio de convección de aire. Debido a que por muchos años se utilizó askarel u otros tipos de PCB's como material de aislamiento, la contaminación y residencia de estos en los aceites de los transformadores actuales es una realidad en especial para los de mayor tiempo de existencia, debido a que estas sustancias no se consideran biodegradables.

Existen varios tipos de transformadores eléctricos, dependiendo de las potencias de trabajo y el uso específico en la industria. En la empresa de distribución de electricidad se utilizan solamente dos a gran escala, los de distribución y los de potencia.

Los transformadores de distribución son los que se colocan en los postes de electricidad, distribuyendo la energía en las casas de habitación circundantes al realizar una conversión a baja potencia (110 V). Pueden tener una potencia de 3 kVA a 500 kVA a razón de las necesidades de la zona, y tienen sistemas de enfriamiento, servicio y montaje específicos para su uso.

Los transformadores de potencia se utilizan principalmente en los planteles de distribución secundarios, donde se toma la corriente eléctrica de alta tensión y se convierte a cantidades manejables para los transformadores de distribución (50 kVA por ejemplo). Son generalmente de gran tamaño y cuentan con un sistema de enfriamiento de aire con flujo de aceite a través de tubos metálicos que rodean el transformador.

2.2.1. Aceite dieléctrico

Como menciona Bartnikas (2000) los aceites minerales se han usado extensivamente en aparatos eléctricos de alto voltaje desde el siglo pasado, constituidos por mezclas de varios hidrocarburos líquidos obtenidos por el refinamiento de crudos de petróleo. Su composición puede ser muy variada dependiendo del proceso de obtención del crudo y su refinamiento pero en general siempre contiene componentes parafínicos, nafténicos y aromáticos, donde los últimos son los de mayor importancia debido a sus características de oxidación y absorción de gases. Los aceites minerales tienen bajos contenidos de moléculas polares y constantes dieléctricas de hasta 2,25, con factores de disipación entre 2×10^{-5} y 6×10^{-5} según su viscosidad y peso molecular.

Este tipo de aceites pueden deteriorarse debido a oxidación y absorción de humedad del ambiente, sin embargo un tratamiento con tierras de fuller puede resultar efectivo para devolverle sus propiedades originales. Se debe tener un cuidado especial con este procedimiento ya que puede además eliminar los componentes aromáticos tan importantes para las propiedades de absorción de aceite.

2.2.1.1. Oxidación del aceite dentro del transformador

Debido a la presencia de oxígeno dentro del transformador con el pasar del tiempo, el aceite sufre una reacción de oxidación a velocidades lentas mientras permanezca una cantidad importante de antioxidante en la mezcla, sin embargo, este se va degradando con el paso del tiempo. Los productos más comunes son de tipo ROH, RCOR, RCHO, RCOOH y RCOOR, sin embargo los grupos alcohol, aldehído y cetona se oxidan rápidamente para formar los ácidos carboxílicos respectivos (Georgiev, Karamancheva, & Topalova, 2007).

La oxidación en los aceites de transformador se ve catalizada por aumento de la temperatura del fluido y el alto voltaje aplicado, como es común en la operación del transformador durante su vida útil en el circuito eléctrico. Como lo menciona Heathcote (2007) por cada aumento en el aceite de 7°C por encima de la temperatura ambiente, se duplica la velocidad de oxidación en el sistema. Aunado a lo anterior se tiene el efecto causado por los compuestos catalíticos presentes. El más importante es el cobre, debido a su fuerte efecto sobre el proceso de oxidación y las cantidades en las que está presente en el transformador, sin embargo también se produce el efecto de catálisis con el hierro, pero de una manera menos intensa.

Existe otro efecto importante a considerar como lo es la acción auto-catalítica. Cuando algunos compuestos aromáticos se oxidan pueden producir compuestos que aumentan la velocidad de la reacción de manera que se produce un efecto acumulativo promoviendo la oxidación del aceite. Como regla general los aceites minerales con un porcentaje de 5%-10 % de compuestos aromáticos son propensos a presentar una oxidación importante.

2.3. Aceites contaminados con bifenilos policlorados

Según Gill (2008) uno de los usos primordiales para los PCB's en el pasado fue como fluidos dieléctricos en transformadores eléctricos, y se les llamó comúnmente Askarel. Sus propiedades excepcionales como alta constante dieléctrica y aislamiento le confirieron cierta ventaja sobre otras sustancias por varios años antes de que se descubriera su verdadera toxicidad y efectos adversos en general.

Luego de su prohibición y reemplazo por aceites minerales, se han realizado varias campañas de eliminación por métodos como incineración y degradación, además de que se ha prohibido su utilización desde hace varios años y eliminado su producción industrial (Eisler, 2000). Según El Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente o 'PNUMA' por sus siglas en inglés (2002), La causa principal de la presencia de estas sustancias en equipos eléctricos con aceite mineral es la contaminación cruzada, debido a que la muchos de los equipos utilizados actualmente con aceite mineral se llenaron en el pasado con askareles, y trazas de estos se mantuvieron dentro del equipo por absorción en su núcleo y/o malos lavados del transformador.

2.3.1. Consecuencias de fugas o derrames de aceites contaminados

Uno de los principales riesgos de mantener en funcionamiento o almacenar transformadores que contengan aceite contaminado con bifenilos policlorados, es que estos logren salir al ambiente debido a una fuga o derrame. Dependiendo de cuánto aceite contaminado salga del recipiente y cuánto tiempo permanezca sin volverlos a contener, más graves serán las consecuencias tanto ambientales como monetarias.

En almacenamiento el riesgo más alto es el de fuga, ya que los transformadores generalmente están lejos de focos de incendio o golpes que puedan producir daños en la estructura metálica. Las fugas no pueden prevenirse de manera segura pero pueden colocarse recipientes de contención bajo cada transformador de manera que pueda controlar cualquier derrame pequeño y así evitar que llegue al suelo o un manto acuífero. Es imperativo que las bodegas o zonas de almacenamiento estén en constante revisión para evitar que se produzca un derrame importante que contamine los alrededores de estas sustancias bioacumulables y peligrosas, y que esto lo realice una persona informada de los riesgos y equipada con el equipo y vestimenta adecuada.

Uno de los riesgos más importantes por considerar es la posibilidad de incendio y/o explosión de un transformador en uso o en almacenamiento, donde la primera opción es la más probable a ocurrir. Existen dos problemas principales con la explosión de un transformador contaminado: una el derrame de una gran cantidad de aceite contaminado al ambiente cercano lo cual puede producir un esparcimiento importante de bifenilos policlorados en zonas habitadas por el ser humano, y la segunda es la pirólisis de los bifenilos produciendo dioxinas y furanos policlorados.

Un ejemplo de lo anterior sucedió en One Market Plaza, San Francisco en Mayo 15 de 1983. Una bóveda que contenía tres transformadores contaminados con Aroclor 1242 como fluido dieléctrico, se incendió quemando aproximadamente 113 litros de esta sustancia. Después de tres horas el humo ya había contaminado la sala de control y conexiones y un parqueo de automotores adyacente y ambos sótanos del centro de tiendas debido al sistema de ventilación, donde se encontraron concentraciones de 720 µg Tetra-cloro-dibenzo-furano/100 cm².

El costo de limpieza total sumó unos \$20 000 000 con un millón de dólares adicionales para reemplazar los transformadores que estaban en la válvula. La demanda más importante fue por parte del departamento de bomberos por \$100 millones de dólares (Pfafflin & Ziegler, 2006). Aunque el incidente está relacionado con Aroclor, una mezcla de bifenilos policlorados y no un aceite contaminado con una concentración relativamente baja de estos, es a manera de ejemplo de cuánto dinero puede estar involucrado en un solo incidente de estas proporciones, y esto sin tomar en cuenta los daños a la salud y ambientales. Comparando el dinero que se tuvo que utilizar para limpiar luego del incendio y el que se debe invertir para descontaminar los aceites, es fácil determinar que la segunda opción es la que se debe seguir, y así proteger tanto a la empresa como a las comunidades que reciben sus servicios.

2.3.2. Procesos de tratamiento de aceites contaminados con bifenilos policlorados

Debido a la peligrosidad inherente de los bifenilos policlorados y la creación del Tratado de Estocolmo, se idearon varios procedimientos para la eliminación de estas sustancias sin poner en riesgo la salud pública ni generar un impacto ambiental de largo plazo. Las tecnologías varían entre destructivas como la incineración y las de aprovechamiento como declorinación y biorremediación. Las últimas denominadas así debido a que el aceite mineral puede recuperarse y regenerarse luego del proceso para ser reutilizado como fluido dieléctrico.

2.3.2.1. Incineración

En el Manual de manejo de PCB's para Colombia (2001) se define que este proceso es el más sencillo en términos de equipos, condiciones proceso, repercusiones ambientales y toxicológicas, necesidad de materiales y demás consideraciones del tratamiento. El proceso se basa en una cámara de incineración donde se introducen los desechos líquidos y sólidos contaminados con PCB's, donde se volatilizan en una primera cámara a 850 Celsius y son incinerados a temperaturas de hasta 1200 Celsius en una cámara secundaria de manera que los bifenilos, ahora en su estado gaseoso sean descompuestos en segundos.

Existe una alternativa a el uso de una incineradora y es el coprocesamiento de los materiales contaminados con el combustible de un horno de tipo cementero, pero esta sólo puede realizarse con concentraciones de PCB's debajo de los 50 ppm o 500 ppm dependiendo del país donde se realice. Lo anterior debido a que las temperaturas no son tan elevadas como en los incineradores y por ende no realizan el proceso con una eficiencia suficiente.

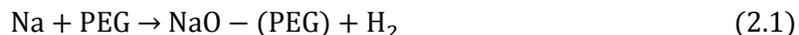
2.3.2.2. Declorinación química con metales alcalinos

Según Pfafflin y Ziegler (2006) es de los primeros procesos que se realizaron para eliminar bifenilos policlorados de aceites contaminados, siendo el primero implementado por la compañía Good Year Tire and Rubber Company usando naftalenuro de sodio para la eliminación de PCB's en fluidos térmicos. Hasta en 1982 fue que Smith y Bubbar realizaron una investigación para utilizar este proceso en aceites de transformadores eléctricos en la Universidad de Ontario, Canadá. El reactivo de sodio se prepara con una reacción entre el naftaleno y un exceso de sodio metálico disueltos en un disolvente tipo éter, comúnmente el tetrahidrofurano en una atmósfera de nitrógeno (para evitar oxidación y producción de furanos o dioxinas altamente tóxicas).

La reacción anterior forma unos cristales de color verde oscuro que reaccionan con los bifenilos para producir cloruros, los cuáles se depositan y pueden ser eliminados sin ningún riesgo ambiental de especial consideración. A medida que se recupere más naftaleno que no haya reaccionado, la eficiencia de la reacción aumentará proporcionalmente. La empresa Acurex Waste Technologies investigó la reacción del proceso y encontró un remplazo para el naftaleno, ya que este es conocido como un contaminante importante.

Brown y Lynch de la Compañía General Electric estudiaron el proceso más a fondo e inclusive sacaron su propia patente (#4, 377,471) utilizando los mismos reactivos pero juntos en una fase dispersa, formando el reactivo de sodio in situ en el reactor de declorinación. Ellos descubrieron que un exceso de sodio metálico proveniente de la reacción de formación del compuesto reactivo mejoraba la eficiencia de la reacción principal de declorinación. Otros estudios realizados por Pilgrim y Webber demostraron que el uso de isopropanol como donador de hidrógeno alteraba la cinética de la reacción de manera que disminuía el tiempo de proceso necesario (Pfafflin & Ziegler, 2006).

Brunelle y Singleton investigaron acerca de la reacción de hidróxido de potasio, polietilenglicol (PEG) y PCB's. Se descubrió que la remoción hasta un 1% de concentración dentro del transformador podía lograrse en menos de dos horas a una temperatura de 100 Celsius. La mayor ventaja de este descubrimiento es que ya no se necesitaba usar un agente órgano-metálico susceptible a la humedad o el aire. El Instituto Franklin en Filadelfia patentó este proceso para su uso exclusivo de tratado de aceites contaminados en transformadores, y con un agente reactivo formando a partir de las siguientes reacciones:



La reacción puede darse en temperaturas relativamente bajas (40-180 Celsius) dependiendo del agente utilizado y el nivel de cloración del bifenilo o mezcla de estos. Como puede verse los productos totales del proceso son aceite no contaminado, hidrógeno gaseoso, bifenilos polihidroxilados y cloruro de sodio, los cuales son de toxicidad mínima y sólo debe tomarse medidas respecto al gas hidrógeno (Pfafflin & Ziegler, 2006).

2.3.2.2.1. Dispersiones de sodio

Según Pfafflin y Ziegler (2006) son bastantes efectivas en los procesos de declorinación, y se comenzaron a utilizar por trabajadores japoneses en 1973 para descontaminar extractos de keroseno de lodos de drenaje. El método fue investigado y refinado por Ian Webber y David Pilgrim, y determinaron que se producen radicales aniónicos de bifenilos policlorados al poner a interaccionar la molécula de PCB con sodio metálico en suspensión. El cloro es desplazado por el radical aniónico y forma moléculas de cloro diatómico, mientras que se forma un radical cloro-bifenilo que extrae un hidrógeno de los componentes del aceite con el resultado de un aceite descontaminado mientras existe un exceso de sodio en dispersión.

2.3.2.3. Sistemas de tratamiento y regeneración de aceite dieléctrico

En la actualidad es muy común que empresas especializadas en el tema de transformadores eléctricos cuenten con un sistema acoplado de tratamiento y regeneración de aceite contaminado con bifenilos policlorados. La practicidad de proceso y el estudio exhaustivo del tema han convergido en sistemas cada vez más eficientes y de menor escala.

Como regla general en todas las opciones de mercado se cuenta con un sistema de declorinación mediante un reactivo de sodio, produciendo cloruro de sodio, hidróxido de sodio y subproductos hidrocarbonados (Kinectrics, 2011). Luego de este proceso se utilizan sistemas de filtración, un desgasificador y torres de adsorción con Tierras Fuller para regenerar el aceite hasta que cumpla o mejore las características de un aceite de transformador nuevo. Ambos sistemas generalmente se fabrican en módulos compactos que pueden transportarse de manera sencilla hasta la empresa que requiere de sus servicios, además de ser autosuficientes y funcionar versátiles en términos del volumen de aceite a tratar (Redragon, 2013).

Según la Corporación Enervac (2013) se muestra un sistema de declorinación con sodio metálico y un sistema de regeneración con torres de adsorción muy similar al que se va a utilizar, aunque con la ventaja de que se utiliza un material con mayor vida útil y menor impacto ambiental que la Tierras Fuller. Además de los desgasificadores se tiene un servicio de deshidratadores de aceite a partir de vacío, para eliminar tanto el agua como hidrocarburos ligeros y contaminantes sólidos. Los equipos se encuentran en distintos tamaños y potencias, de manera que se pueda obtener el adecuado para el volumen de aceite que se desea tratar.

2.3.2.4. Biorremediación

Villafañe-Deyack y Laboy-Nieves (2010) definen la biorremediación como un método en el cual se trata el aceite contaminado con bifenilos policlorados con microorganismos específicos para su degradación. Generalmente se utiliza para la descontaminación de suelos luego de un derrame de aceite con PCB's, y es un proceso que aventaja a los otros por la simplicidad del tratamiento y su bajo costo en comparación con los otros métodos. La utilización de este método para reutilización del aceite no es plausible, debido a que los agentes microbianos degradan tanto la molécula de bifenilo como los demás hidrocarburos que constituyen el aceite hasta compuestos más estables y sencillos como dióxido de carbono y agua, imposibilitando su recuperación y regeneración.

Debido a la naturaleza del proceso a estudiar y lo riesgoso de un derrame de aceite contaminado, la biorremediación podría ser un método efectivo para minimizar el contacto de los PCB's con el ambiente, y de paso mejorar la seguridad laboral de la empresa. Si bien es cierto que se planea impermeabilizar los pisos tanto de la zona de trabajo como el de la bodega de transformadores, a la hora de tratar derrames la utilización de aserrín o trapos puede resultar en una contaminación cruzada o efectos adversos en la salud del personal encargado de atención de emergencias.

2.3.3. Procesos de tratamiento de transformadores con bifenilos policlorados

A pesar de que la mayoría de los bifenilos policlorados son extraídos con el aceite contaminado para ser declorinado, una cantidad importante es absorbida por el núcleo del transformador. En caso de que este equipo pueda ser reutilizado, agregar aceite tratado o nuevo ocasionaría una lixiviación

de los PCB's hacia este contaminándolo hasta una concentración que podría sobrepasar la permitida. Es por lo anterior que debe realizarse un tratamiento adecuado al núcleo y los materiales porosos del transformador, de manera que pueda eliminarse el aceite contaminado con PCB's de los materiales absorbentes, evitando una contaminación posterior.

2.3.3.1. Retrolleado

Como mencionan Pfafflin y Ziegler (2006) es una de las técnicas por excelencia de tratamiento de equipos contaminados con bifenilos policlorados, en nuestro caso transformadores eléctricos. Para que el proceso se considere eficaz el aceite dentro del transformador debe tener una concentración no detectable por métodos actuales de PCB's (50 ppm), esto cumpliéndose generalmente cuando la concentración inicial es de 500 ppm o menor en el aceite contaminado dentro del transformador. Si lo anterior no se cumple, es muy probable que el proceso deba repetirse al menos una vez.

El proceso se inicia con el vaciado del transformador y su posterior llenado con aceite no contaminado, almacenando el otro para su posterior tratamiento. Aproximadamente un tres por ciento de la concentración de bifenilos policlorados iniciales quedan dentro del núcleo y demás materiales absorbentes (papel, núcleo de acero y cableado) dentro del transformador, y contaminan el aceite hasta un punto de equilibrio noventa días después del tratamiento. Se pueden realizar lavados con tricloroetileno para mejorar significativamente la eliminación de PCB's, sin embargo por sus propiedades toxicológicas y cancerígenas es considerado un peligro para la salud en las personas que trabajan con este o viven cerca de las empresas que lo emplean.

Estudios han demostrado que los costos agregados de retrolleado como transporte, pruebas de concentración de PCB's, equipos y demás son menores que el costo total de remplazo del transformador por uno nuevo. Para el año 2006 el costo de retrolleado de un transformador de 500 kVA y 190 galones era de aproximadamente \$18,000 mientras que un transformador nuevo más costos adicionales tendrían un valor agregado de \$30,500. Se concluyó además que entre más grande e inaccesible un transformador es, se ahorra más dinero utilizando retrolleado que remplazo por uno nuevo.

2.3.3.2. Extracción por solvente

Según la empresa Sea Marconi (2011) es un proceso alternativo para el tratamiento del núcleo del transformador contaminado con aceite con PCB's es la extracción. Utilizando un solvente como tricloroetileno o percloroetileno se puede extraer el aceite absorbido en las superficies metálicas y sólidos porosos como el papel. El proceso es regido por la difusión del aceite al solvente utilizado por lo que requiere de un tiempo de contacto importante dentro del transformador.

Luego de la extracción se realiza una destilación atmosférica para obtener de nuevo el solvente y poder reutilizarlo en la primera etapa. Los fondos de la torre son el aceite y los bifenilos por lo que deben almacenarse y luego tratarse por medio de uno de los procedimientos mencionados anteriormente. El proceso generalmente se utiliza para equipos con alta concentración de PCB's (mayor a 50.000 ppm) y se comprueba su eficacia al igual que el retrolleado, analizando una muestra representativa del aceite con el que se llena el transformador luego del proceso luego de un período determinado de tiempo.

CAPÍTULO III: ESTUDIO DE TRAMITOLOGÍA

Una de las partes más importantes en la puesta en marcha de un proceso nuevo, y que generalmente toma más tiempo de lo que se estimó, son los procesos de reglamentación en donde la empresa debe informarse sobre los permisos que debe tener para trabajar dentro de las leyes y reglamentos acordes a su naturaleza. Los trámites pueden ser exhaustivos y rigurosos por lo que deben realizarse de manera inmediata para no atrasar el inicio de operaciones, además de asegurarse de obtener todos los permisos ya que un solo incumplimiento puede concluir en el cierre definitivo de la planta.

3.1. Convenios y reglamentación de carácter internacional

Son leyes de carácter internacional, las cuales entran en rigor en el momento en que el país ratifica el Convenio de donde se generaron. La mayoría de estos nacieron a razón de un problema cuya afectación es de carácter mundial, por lo que se establecen medidas de trabajo para remediar o mitigar el problema definido. Los convenios internacionales se encuentran por encima de la legislación nacional, por lo que es imperativo que se cumplan las tareas y reglamentos allí mencionados.

3.1.1. Convenio de Estocolmo sobre Contaminantes Orgánicos Persistentes

Debido al aumento en los esfuerzos por sensibilizar a las personas sobre las consecuencias de ciertas sustancias en los seres vivos y la protección del medio ambiente en general, se generó la decisión 19/13 del Consejo de Administración del Programa de Naciones Unidas para el Medio Ambiente y la Declaración de Río sobre el Medio Ambiente y Desarrollo. En estas se acordó mediante una reunión de Partes (países) este convenio para proteger la salud humana y el medio ambiente frente a los contaminantes orgánicos persistentes.

3.1.1.1. Generalidades

El convenio describe las propiedades que debe tener un producto químico para considerarse persistente, las responsabilidades y objetivos que deben tener los países miembros para la eliminación o reducción de estos, la estructuración política, financiera y social de los entes reguladores del convenio, la solución de controversias entre las Partes y como se evaluarán los cambios realizados entre otras regulaciones. Adherido a este vienen anexos sobre los componentes orgánicos persistentes y sus propiedades básicas para identificarlos, una extensión específica para los bifenilos policlorados y sus propiedades y riesgos asociados, restricciones de uso para estas sustancias y finalmente información importante acerca de cómo agregar una sustancia a la lista tomando en cuenta propiedades físicas y aspectos socioeconómicos e impacto ambiental.

3.1.1.2. Análisis del convenio

Las empresas en el país relacionadas con las sustancias persistentes mencionadas en este convenio tienen como obligaciones generales:

-Reglamentar y prohibir la producción y utilización de los componentes orgánicos persistentes, dentro de los cuales se encuentran los bifenilos policlorados y los equipos contaminados con estos.

(Que contengan 0.005% de bifenilos policlorados y volumen superior a 0.05 litros). La Compañía debe responsabilizarse por que estas sustancias orgánicas persistentes sean tratadas químicamente de manera que se transformen en desechos cuyo vertido final produzca la menor cantidad de contaminación asociada

-La importación y exportación de sustancias contaminadas con PCB's se limita a su transporte hacia disposición final en un país con la tecnología apropiada para realizarlo. Esta posibilidad ya fue analizada por la Compañía y se encontró que los costos y tramitación para realizarlo (Convenio de Basilea) son demasiados como para que sea una alternativa viable según los objetivos de la empresa.

-Presentación de informes cada cinco años acerca de los esfuerzos realizados por el país para la eliminación de PCB's, conteniendo una lista de datos estadísticos sobre la producción, tratamiento y movimientos transfronterizos de las sustancias hasta la fecha. En esta materia La Compañía es pionera ya que ninguna empresa en el país está realizando esfuerzos por tratar sus transformadores contaminados con bifenilos policlorados. Se espera que el trabajo que realiza la Compañía abra las puertas para que las demás la sigan en el proceso de eliminación de PCB's.

La Compañía debe aunar esfuerzos para primeramente identificar todos los transformadores que contengan bifenilos policlorados y retirarlos de servicio, y luego utilizar las medidas necesarias para proteger los aceites en almacenamiento para que se disminuyan al máximo los riesgos de incendio dentro de este sistema. Se debe realizar investigación acerca de las estrategias formuladas en caso de una liberación de estas sustancias al ambiente, examinación de los resultados a razón del tiempo, campañas de conocimiento y sensibilización para los trabajadores directamente asociados y público en general, promoción de las técnicas más eficientes y realistas para la reducción en la síntesis de estas sustancias peligrosas y en general un plan de acción inmediato para la disminución de sustancias orgánicas persistentes.

-Sensibilizar e informar a sus empleados, gerentes y demás trabajadores a formular políticas y protocolos para el tratamiento de los PCB's, además de los riesgos asociados con estos. Se debe informar también al público en general sobre los bifenilos policlorados y sus efectos sobre la salud y el medio ambiente, en especial a las personas en mayor riesgo como mujeres embarazadas, niños y personas que habiten cerca de las zonas de almacenaje y procesamiento de estas sustancias, todo esto mediante señalización, hojas de seguridad, campañas de sensibilización y demás métodos de difusión de información. Finalmente se deben capacitar personas para la caracterización, identificación y el manejo de PCB's de manera que se pueda realizar su tratamiento de una manera ambientalmente responsable y cuidando la salud pública.

En términos del Convenio de Estocolmo, el Ministerio de Ambiente, Energía y Telecomunicaciones (2009) menciona que la institución asociada directamente en Costa Rica es la Dirección de Gestión de Calidad Ambiental, la cual es una instancia del Ministerio de Ambiente y Energía creada en el 2002 por consecuencia directa de la Ley Orgánica del Ambiente 7554 y la elaboración de inventarios nacionales de compuestos orgánicos persistentes.

De lo mencionado anteriormente, según el Ministerio de Ambiente, Energía y Telecomunicaciones (2009) se han hecho grandes avances en la identificación de equipos que contengan bifenilos

policlorados en las empresas de electricidad más importante del país como el ICE, la CNFL, Junta Administrativa de Servicios Eléctricos de Cartago, la Empresa de Servicios Públicos de Heredia, Coopelesca, CoopeSantos, Coope Alfaro Ruíz y CoopeGuanacaste.

Actualmente las instituciones responsable de regular los COP's son el Ministerio de Salud que se encarga de registrar las sustancias peligrosas y remitir permisos para su manejo, El Ministerio de Ambiente y Energía el cual entre sus funciones está la dirección y comunicación del país con el Convenio de Estocolmo, y demás instituciones que se mencionarán más adelante ya que están encargadas de otros aspectos de la reglamentación del proceso en estudio.

Las legislaciones en Costa Rica son muy generalizadas en términos de producción, tratamiento, transporte y manejo de los contaminantes orgánicos persistentes, y en general solo existen reglamentos poco específicos sobre sustancias peligrosas. Tampoco existe ningún tipo de regulación acerca de la producción no intencionada de dioxinas y furanos más que la regla empírica de definir una sustancia contaminada si posee 50 ppm de bifenilos policlorados, y como estas no pueden ser utilizadas en coprocesamientos de horno cementero como combustible.

3.1.2. Convenio de Basilea sobre el control de los movimientos transfronterizos de los desechos peligrosos y su eliminación

Entró en vigor el 5 de Mayo de 1992 debido a la importancia que tomó la gestión de los desechos peligrosos desde el decenio de 1980 en todo el mundo con programas como el de Montevideo o el de Las Naciones Unidas (PNUMA). Como objetivo principal se tiene proteger la salud de las personas y el medio ambiente frente a los efectos perjudiciales de los desechos peligrosos, y se especializa en la exportación o importación de los desechos para su tratamiento o vertido final.

El convenio en general define las responsabilidades y derechos que tiene cada Parte a la hora de transportar desechos peligrosos por su territorio ya sea provenientes de otro país o destinados para salir a otro, o bien ambas. Además de lo anterior se definen las regulaciones y trámites a seguir para realizar cualquier tipo de transporte transfronterizo de sustancias peligrosas, medidas a tomar cuando este transporte afecta países o zonas que no son parte del convenio y en general consecuencias y penalizaciones a tomar en cuenta cuando se incumple con el convenio.

Como información adicional se presentan anexos sobre categorización de los desechos que deben controlarse (desecho tanto regulares como especiales), Una lista de características peligrosas que puede tener una sustancia, operaciones que pueden utilizarse para disposición final, regeneración, reciclado o reutilización de desechos peligrosos, información que debe presentarse para realizar cualquier transporte transfronterizo, listas de desechos comunes y posibles sustancias que pueden contener en sustancias peligrosas en cantidades variables, sustancias orgánicas o inorgánicas y mezclas de estos (Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente, 2011).

Este Convenio cobra mucha importancia en el trabajo debido a que la empresa que desea tratar los aceites tiene pensado exportar todos los residuos sólidos y materiales impregnados con aceites contaminados con bifenilos policlorados, los cuáles están absorbidos y por ende no pueden ser extraídos para tratarse en el mismo proceso de decoloración. A continuación se presentarán de manera explícita las condiciones a tomar en cuenta para realizar esta exportación, de manera que no se presenten problemas con este proceso y se minimicen los gastos innecesarios.

Viendo el Convenio de una manera más específica a razón de lo expuesto anteriormente, se tiene que los productos a exportar deben estar embalados y etiquetados de manera correcta de conformidad con los reglamentos reconocidos internacionalmente, como Las Recomendaciones para el Transporte de Mercancías Peligrosas (RTDG por sus siglas en inglés) de la UNECE. El documento permite una unificación y generación de lineamientos básicos que permite un ordenamiento en términos de exportación e importación de sustancias peligrosas, debido a la heterogeneidad de los reglamentos y leyes para casa país del orbe (United Nations Economic Commission for Europe, 2014).

Además los desechos deben de contar con un documento similar al manifiesto de transporte que lo acompañe durante todo el recorrido y cuente con la información básica del material, generador y ente que dispondrá responsablemente de este, además de la información común sobre atención de derrames y emergencias asociadas a los contaminantes transportados.

Un aspecto importante es que los materiales solamente pueden ser exportados si no existe en el país la tecnología necesaria para su tratamiento, lo cual se cumple ya que se planea enviar solamente los materiales que han sido contaminados por aceites con PCB's debido a contacto directo y no pueden extraerse éstos de manera segura y eficiente. Otra parte importante es que el ente importador final debe utilizar los residuos del tratamiento de descontaminación en algún tipo de sistema de reciclado siempre y cuando la naturaleza del material se lo permita.

Es imperativo que la empresa se comunique con el ente rector del Convenio en el país, siendo en nuestro caso el Ministerio de Salud según la ley 7438, la legislación nacional basada en el convenio internacional de Basilea. Según el Ministerio de Salud (2013) se debe otorgar toda la información pertinente al transporte y debe estar registrado como producto peligroso ante el Ministerio, de manera que ya se cuente con las características importantes del residuo.

Además de lo anterior debe proporcionarse información para la generación de la nota de información para los estados participantes en el transporte de los residuos peligrosos, tanto los de paso como el ente importador. En el anexo VA viene estipulado por puntos y entre lo más importante está la información del lugar de eliminación e información del ente encargado, Estados de tránsito involucrados, itinerario completo y fechas tentativas para el transporte completo, medio de transporte previstos, tipo de empaquetamiento, peso total, proceso de generación y de eliminación de los residuos, declaración de veracidad de la información y el contrato e información pertinente a este.

En general la empresa a cargo del proyecto debe estar anuente de los reportes a realizar cada año civil por parte del Ministerio de Salud hacia la Secretaria del Convenio, de manera que pueda servir de apoyo y otorgar la información que facilite la acción mencionada anteriormente. Toda información relacionada con la experiencia de la exportación puede ser valiosa para su retroalimentación y ordenamiento, de manera de que se trabaje en conjunto para encontrar procedimientos de eliminación de productos peligrosos más amigables con el ambiente.

En caso de que el proceso de transporte no se realice de manera adecuada a razón de los Estados externos, la empresa tiene la obligación de notificar al Ministerio lo ocurrido y que este lo comunique a la Secretaría, y realizar esfuerzos para minimizar cualquier daño o impacto ambiental

que se genere por esta anomalía. Cualquier discrepancia entre partes debe tratar de resolverse por negociación directa o acudir por mutuo acuerdo a la Corte Internacional de Justicia.

Según los anexos I, III, IV y VIII los residuos se clasifican como:

- Y10: Sustancias y artículos de desecho que contengan, o estén contaminados por bifenilos policlorados (PCB), terfenilos policlorados (PCT) o bifenilos polibromados (PBB).
- H12: Denominados ecotóxicos, siendo sustancias que al ser liberadas al medio ambiente pueden generar efectos adversos inmediatos o retardados en el sistema, debido a sus propiedades de bioacumulación o toxicidad en los sistemas bióticos.
- D10: Incineración en la tierra, asumiendo este ya que es el procedimiento más eficiente para la eliminación de residuos sólidos contaminados con PCB's. En el caso del proceso analizado, la empresa a cargo tiene planeado un contrato ya sea con Florida Transformers o Clean Harbours. La primera empresa no especifica el proceso que utiliza pero Clean Harbours (2013) menciona que utiliza la incineración como tecnología de tratamiento de sólidos contaminados con PCB's, por lo que la clasificación D10 es correcta en caso de la contratación de esta empresa.
- A3180: Desechos, sustancias o artículos que contienen, consisten o están contaminados con bifenilos policlorados (PCB), PCT's, PCN's o PBB's o cualquier otro compuesto polibromado análogo, con una concentración mayor o igual a 50 mg/kg.

Por ende se tiene toda la información pertinente para realizar el trámite correspondiente en el Ministerio de Salud, en caso de que se desee la exportación de estos residuos peligrosos. Como se analizará más adelante, pueden realizarse procedimientos alternativos para tratarlos, que deberán estudiarse para determinar su viabilidad económica.

3.2. Leyes y reglamentación vigente en Costa Rica

Aunque existe una legislación nacional poco específica en cuanto a compuestos persistentes, la instalación y puesta en marcha del proceso se ve regido por reglamentos de instituciones estatales, como lo son la SETENA, El Ministerio de Salud, El Colegio de Ingenieros Químicos y demás organizaciones. Antes de implementar un proceso nuevo deben de obtenerse los permisos otorgados por todas las instituciones relacionadas, para así asegurarse un proceso seguro y ambientalmente responsable.

3.2.1 Ley Orgánica (8412) Del Colegio De Ingenieros Químicos y Profesionales Afines

En esta ley se definen todas las normativas que competen al ejercicio de la ingeniería química en el país, además de la estructura y obligaciones que tiene el Colegio de Ingenieros Químicos y Profesionales Afines respecto a la legalización de los procesos químicos industriales y las personas que los diseñan, construyen y ponen en marcha. La tramitación en el Colegio viene enfatizada en los diagramas y planos de planta, los cuales deben ser diseñados y verificados por un ingeniero químico debidamente colegiado, además de tener el visto bueno del CIQPA.

Esta reglamentación está asociada con los trámites en la Secretaria Técnica Nacional Ambiental (SETENA), y de no realizarse puede concluir en el paro de construcción o cierre de operaciones de

una planta, ya que el CIQPA cuenta con un fiscal y un abogado que velan por el cumplimiento de esta ley y los reglamentos asociados (Colegio de Ingenieros Químicos y Profesionales afines, 2004).

3.2.1.1 Análisis del reglamento para la confección y tramite de planos del Colegio de Ingenieros Químicos y Profesionales Afines

Para la construcción de una nueva planta o ampliación de una ya existente, se necesitan presentar tres tipos generales de diagramas para aprobación de la obra según el Ministerio de Salud. Estos son los planos constructivos o de obra gris, los planos eléctricos y los planos y diagramas industriales químicos. Para el tipo de proceso y planta que se piensa implementar (equipos ya instalados y conectados en un módulo) solo el tercer tipo de diagramas son necesarios de elaborar.

El Colegio de Ingenieros Químicos y Profesionales Afines definió este reglamento para unificar la teoría que se había establecido sobre planos y su confección, homogenizar normalizar su presentación, definir las competencias de los ingenieros químicos en el tema y corroborar que se realicen los planos necesarios para cada tipo de empresa.

Según el Colegio de Ingenieros Químicos y Profesionales Afines (2010) existen once tipos de diagramas y planos que competen al profesional en ingeniería química, de los cuales se mencionan a continuación lo de mayor relevancia para el proceso:

1-Diagrama de flujo: Es la representación de la planta o parte de ella (dependiendo de si es muy compleja o no para dibujarse en una sola lámina) y en esta se muestran los equipos, líneas de conexión entre éstos, servicios principales, algunos accesorios importantes y en general cualquier valoración o características importantes del proceso que sean de especial consideración, teniendo el cuidado de no saturar la lámina al punto de que no sea sencillo entender el proceso.

2- Diagrama de tuberías e instrumentación: En general se enfoca en las líneas que conectan los equipos y el material del cual se fabrican y el diámetro de cada tubería. Además se pueden agregar características del fluido como presión, temperatura, viscosidad, velocidad de flujo, entre otros. Finalmente se dan características y distintos de accesorios conectados a estas líneas, y algunas observaciones pueden agregarse del papel que cumplen según seguridad, control y regulación del proceso.

3- Planos de ubicación: Son los planos generales de la distribución espacial de la empresa, relacionado intrínsecamente a la obra gris. Se definen donde se encontraran los edificios, patios, áreas verdes y en general la distribución de servicios dentro de la empresa como sodas, zonas de recreación, entre otros.

4- Planos de impacto y evacuación de emergencias: Son diagramas a escala donde se especifican los lugares donde se colocan extintores, botiquines y demás equipos de emergencia. Estos planos son tanto para la zona de proceso y equipos como para las oficinas y zonas de recreación, alimentación, y en general toda zona de la empresa destinado para personal humano.

5- Planos de instalaciones de protección contra el ambiente: Estos conforman todos los diagramas de proceso para sistemas de tratamiento de residuos con el fin de minimizar el impacto ambiental. Entre estos están un sistema de lodos activados, tratamiento de aguas residuales, sistemas de

compostaje, entre otros. Los planos son conjunto de varias láminas que representan la ingeniería del proceso, características, condiciones de diseño y demás propiedades intrínsecas del proceso.

Para la planta de tratamiento de aceites contaminados con bifenilos policlorados que se desea implementar, sólo algunos de estos planos y diagramas son necesarios, y como regla general deben realizarse como mínimo siete de estos, los que sean más importantes para el tipo de proceso.

Los planos deben contar con el nombre, sello y firma del encargado así como el refrendo del Colegio, donde se haga constar que se cumple todo lo establecido en el Artículo 19 de la ley y su Reglamento en cuanto al registro de contratos. En cuanto al formato de los planos a entregar, como todo documento público deberán tener una presentación estándar establecida por la normativa ISO-TC 10/SC 10 en cuanto a tamaño, simbología, identificación y balances de materia y energía.

3.2.2 Reglamento 11492-SPPS de Higiene Industrial

Asociado directamente con la Ley General de Salud y el Ministerio de Salud, es el reglamento que establece los tipos de establecimientos industriales y las acciones que producen incomodidad o efecto negativo en las inmediaciones. Además de lo anterior se exponen algunas acciones de mitigación para mantener el espacio de trabajo con una correcta higiene industrial y los requisitos necesarios para obtener el permiso de construcción o remodelación. Debido a que la empresa debe realizar remodelaciones estructurales para poder llevar a cabo el proyecto, es importante que se proceda a renovar el permiso asociado a este reglamento.

3.2.3 Reglamento de permiso de funcionamiento del Ministerio de Salud

En este se establecen las categorías de riesgo de las actividades de la empresa según su naturaleza y la documentación necesaria para realizar el trámite de otorgamiento del permiso. Se mencionan los planes que deben elaborarse luego de obtener el permiso, y las características básicas del plan de emergencia, el de manejo de desechos y el de salud ocupacional. En este caso se deben de reportar Área Rectora de Salud del Ministerio los cambios ocurridos en la empresa y esta solicitará la documentación que crea necesaria para analizar el cambio realizado, al punto de solicitar el trámite del permiso como si no se hubiera realizado antes. Es importante por lo tanto renovar el permiso y determinar las acciones a realizar según el Ministerio de Salud, debido a la implementación de los nuevos procesos de decoloración y regeneración en la infraestructura existente.

3.2.4 Reglamento general de seguridad e higiene en el trabajo

Es regulado en específico por el Ministerio de Trabajo, el cual otorga el permiso de operación de la planta si se le aprueban al desarrollador los planos de ubicación, mecánica, eléctricos y el catastrado de la zona. En general el reglamento establece las condiciones de menor riesgo laboral, a base de organización y regulación de las acciones en el espacio laboral y con esto generar un ambiente de trabajo lo más seguro posible. Se mencionan los generadores de riesgo más comunes en el ámbito industrial (motores, electricidad, calderas) y como mitigar sus efectos para minimizar los accidentes y condiciones incompatibles con un ámbito de trabajo seguro y salubre.

Como puede verse este permiso debe renovarse debido al cambio estructural y ampliaciones realizadas en la zona del proyecto, por lo que deben de confeccionarse los planos mencionados

anteriormente y comunicarse con la oficina del Ministerio de trabajo para realizar el trámite con la mayor celeridad posible.

3.2.5 Viabilidad Ambiental otorgada por la SETENA

Este es uno de los permisos más importantes del estudio, ya que se necesita de mucha documentación para realizar el trámite. No se puede comenzar la operación sin obtener la viabilidad, se le da un seguimiento constante por parte de la Institución reguladora y debido a constantes solicitudes de información e inconsistencias burocráticas, se necesita de un amplio lapso de tiempo para obtener la viabilidad ambiental. En general se requiere que la empresa otorgue toda la información relacionada a los posibles impactos ambientales que puede generar la realización del proyecto, y mediante una matriz de impactos determinar la magnitud de los aspectos ambientales y las medidas de mitigación necesarias para disminuir sus efectos al área estudiada.

El proyecto debe contar con un consultor ambiental responsable inscrito en la SETENA, que esté a cargo de la tramitación y comunicación con el profesional a cargo del caso dentro de La Secretaría. Se debe llenar un formulario denominado D1 con la información descrita anteriormente para determinar la Significancia del Impacto Ambiental (SIA), un valor numérico que engloba el impacto ambiental potencial para cada uno de los aspectos y componentes estudiados. El proyecto en estudio obtuvo un SIA de 87, de manera que el proyecto se define como un B₂ y sólo es requerida una Declaración Jurada de Compromisos Ambientales. El Documento D1 se muestra en el ANEXO 1. El estudio más detallado de los aspectos generales y secundarios, además de su interrelación, se muestran en el capítulo 6.

En el Reglamento General sobre los procedimientos de Evaluación de Impacto Ambiental, se muestra que se categoriza un proyecto como B₂ cuando su impacto ambiental potencial se considera como moderado-bajo. La Declaración jurada de Impacto ambiental debe presentarse ante un notario público, y comprometerá a la empresa a cumplir con lo siguiente:

- Todas las medidas ambientales propuestas por el desarrollador en el D1.
- Las medidas ambientales indicadas por las SETENA durante la revisión del D1 y su Resolución final sobre el proyecto.
- Los lineamientos ambientales establecidos en el Código de buenas Prácticas Ambientales y las demás regulaciones ambientales vigentes en el país y aplicables al proyecto.
- Brindar las facilidades necesarias a la SETENA y organizaciones que colaboren con ella, en las inspecciones de cumplimiento que pudieran darse en el sitio donde se ejecuta el proyecto.
- Informar a la SETENA sobre cualquier cambio sustancial (ampliaciones o cambios en el proceso productivo) que el desarrollador planea llevar a cabo en el proyecto en estudio, y puedan aumentar el impacto ambiental generado.

Luego de que la SETENA revise la declaración jurada y defina que las condiciones establecidas se cumplieron a cabalidad, se emitirá y notificará la resolución administrativa para otorgarle la viabilidad ambiental a la empresa encargada del proyecto. Este procedimiento tardaría un máximo de una semana, a menos que se establezca que las condiciones establecidas no se cumplieron, para lo que se establecería un único plazo adicional para asegurar su cumplimiento.

CAPÍTULO IV: ANÁLISIS DE LOS SITIOS DE ALMACENAMIENTO DE TRASFORMADORES CON ACEITE CONTAMINADO

4.1. Almacenamiento de aceites contaminados

Uno de los factores más importantes que se deben analizar en este proyecto es el almacenamiento de los transformadores eléctricos que contienen aceites contaminados, ya que estos han permanecido en este estado un tiempo apreciable y deben estar así en espera del inicio de operaciones y puestas en marcha de la planta. Como cada día de almacenamiento significa un aumento en el riesgo de una fuga o derrame de aceite al ambiente, es importante que se tomen las medidas necesarias para evitarlo y así proteger a las comunidades aledañas y a los trabajadores que forman parte de la empresa.

Debido a la falta de reglamentación específica para el almacenamiento de este tipo de contaminantes, se utilizarán las recomendaciones mínimas para el almacenamiento seguro de equipos contaminados con bifenilos policlorados que se muestran en el Manual de manejo de PCB's para Colombia (2001) y se resumen a continuación:

- Almacenamiento por lo menos a 100 metros de puntos sensibles como mantos acuíferos, áreas de producción o manejo de alimentos, hospitales, zonas de tránsito congestionado o densamente pobladas, entre otros.
- Tener piso impermeable, totalmente techada o cubierta y con zonas o herramientas de contención secundarias que puedan almacenar al menos el 125% de los líquidos almacenados.
- El lugar de almacenamiento debe estar protegido de personas externas, con paredes o rejas de por lo menos dos metros de altura, con púas en la parte de arriba y una puerta o reja con candado.
- Tanto en la puerta como en la cerca se deben colocar avisos acerca de los PCB's, de manera que la gente que transite o viva por la zona esté al tanto de que ahí se almacenan este tipo de sustancias.
- Los aceites, piezas de equipos y demás objetos contaminados deben almacenarse en tanques o tambores de acero, con doble empaquetadura.
- Se debe llevar registro sobre entradas y salidas de bifenilos policlorados, inspecciones realizadas al sitio, actividades de mantenimiento y visitas en general de personal ajeno a la empresa.
- Las personas a cargo de las instalaciones de almacenamiento y las autorizadas a visitar el lugar deben tener conocimiento de los protocolos de emergencia, que deben realizarse en caso de eventualidades como incendio, vandalismo, derrames, entre otros.
- En caso de no contar con las instalaciones apropiadas, se pueden realizar centros de almacenaje a corto plazo, en contenedores para embarque marítimo de acero o bien un área de terreno plano, donde se coloquen los equipos y se cubran con abundantes capas de plástico y se entierren los bordes de estas capas en un montículo de tierra. El suelo del método de almacenamiento con capas de plástico debe estar también cubierto por capas de este material, y se debe asegurar que estas no sean desplazadas por el viento y que la lluvia caiga y se acumule en los montículos de tierra.

- En toda instalación de almacenamiento a largo plazo, los aparatos y tanques deben colocarse sobre estibas de apoyo y aferrarse de estas, para que cualquier fuga pueda ser detectada de manera rápida. Se debe evitar estibar los tanques más de dos niveles si estos contienen líquidos y dejarse corredores entre filas para hacer inspecciones de una manera más fácil.

4.2. Análisis de visita a los planteles de La Compañía

El 20 de setiembre del 2013, se realizó una visita a los lugares de almacenamiento de los transformadores y demás contenedores contaminados con PCB's, para determinar el estado de estos y si están cumpliendo con las condiciones mínimas para que el almacenamiento sea seguro y cumpla con las leyes y reglamentos establecidos.

La Compañía cuenta con cuatro planteles donde se almacenan transformadores con aceite contaminados, todos en la provincia de San José. Existen las estaciones en Desamparados y San Rafael con transformadores de distribución de distintos voltajes, y los planteles de Hatillo y Guadalupe que tiene transformadores de potencia. No se visitó este último ya que hay solo un transformador en ese sitio, además de que las condiciones son muy similares a las del plantel en Hatillo.

Como en el reglamento de Estocolmo no se definen las condiciones mínimas de almacenamiento de sustancias persistentes, sino que se establecen normas generalizadas sobre un manejo responsable de las sustancias y materiales contaminadas, la definición de los estatutos mínimos requeridos se establecerán según los reglamentos nacionales (como el 27001 sobre manejo de desechos industriales y el 28930-S de manejo de productos peligrosos) y reglamentos internacionales de países donde se han tratado los bifenilos policlorados. Finalmente se tomarán en cuenta los conocimientos técnicos sobre almacenamiento de sustancias peligrosas definidos en (American Institute of Chemical Engineers, 1998).

Por lo mencionado anteriormente, es necesario aclarar que las observaciones y recomendaciones que se presentan en este análisis son subjetivas a reglamentos que no competen de manera directa al país a falta de reglamentos más precisos, pero que son lineamientos formulados con conocimiento de las condiciones mínimas para un almacenamiento seguro y protección de la salud de los seres vivos involucrados. Las ideas expuestas deben tomarse como recomendaciones para evitar que los PCB's salgan de su contención y se esparzan en el ambiente cercano, contaminando el ambiente y poniendo en peligro la salud pública.

4.2.1. Sub-plantel Desamparados

En esta zona se mantienen varios transformadores y barriles que contienen aceites contaminados con PCB's, dispuestos en una cama de arena de aproximadamente diez centímetros de espesor y bajo la cual descansa una membrana de plástico absorbente como medio de contención primario para fugas. La cama de arena está delimitada por un muro de cemento de aproximadamente veinte centímetros de altura, y serviría de medio de contención secundario en caso de una fuga de aceite contaminado de mayores proporciones. Además de lo anterior los transformadores y barriles están ordenados sobre tarimas de madera (estibas) para un mayor ordenamiento y protección de los

recipientes en caso de fuga o inundación. En la Figura 4.1 se muestran las condiciones mencionadas de los contenedores en almacenamiento.

Cabe destacar que el aceite contenido por los barriles que se encuentran en esta zona de almacenamiento proviene de los mismos transformadores del lugar. El trasvasado se realizó por distintas razones pero en general debido a que el equipo se encontraba en mal estado ya sea general o focalizado (válvulas, sello, entre otras). Aunque lo anterior implica que estos transformadores ya no contienen aceite contaminado, deben aun así transportarse a la empresa para realizarles el proceso de retrolleado correspondiente.



Figura 4.1. Almacenamiento de los transformadores y barriles con aceite contaminado

Para apaciguar las inclemencias climáticas se cuenta con una lona de polietileno que cubre toda la zona de almacenamiento, aferrada al suelo por cables para evitar que se movilizce y un solo cable manteniéndola erguida, aferrado a un árbol cercano a la zona. La disposición de la lona y lo explicado anteriormente se ejemplifica en la Figura 4.2, en la vista lateral de la zona de almacenamiento.

Se puede observar a simple vista como la disposición de la lona de polietileno provocó que los bornes de los transformadores la perforaran, permitiendo la entrada de agua y polvo. Lo anterior pudo haberse evitado con una conformación estructural distinta, como se estudiará más adelante como solución a este problema y el del estancamiento.



Figura 4.2. Disposición de la lona en el plantel Desamparados.

Como puede verse en la Figura 4.2, los recipientes están bien protegidos contra lluvias y demás condiciones ambientales, sin embargo también se denota que existe el problema de la acumulación y canalización del agua en distintas partes de la lona. Esto tiene como problemas principal la formación de sitios de crecimiento bacteriano y reproducción de mosquitos como el *Aedes Aegypti*. Además de lo anterior, como se muestra en la Figura 4.3, uno de los cúmulos principales de agua formó dos agujeros en la lona, lo que permitió el ingreso de este líquido al sitio de almacenamiento.



Figura 4.3. Agujeros formados por estancamiento del agua llovida sobre la lona de protección

Este problema del estancamiento es el que debe solucionarse de primero, ya que es el que está atentando contra la salud pública y la protección de los contenedores de aceite contaminado. La solución ideal sería la construcción de una bodega de cemento y techada pero esto requiere mucho tiempo y dinero, por lo que no es la opción más viable. La solución presentada es la colocación de la lona de manera que no se produzca acumulación de agua en sus parte superior, y la formación de montículos de tierra en las esquinas donde la lona toca el suelo, de manera que los flujos de agua llovida sean absorbidos y distribuidos evitando el estancamiento.

Luego de análisis de posibilidades, se determinó que la solución más simple y de menor costo agregado es la colocación de un sistema de techo de “tijeras” (ya sea de metal o madera) como el que se muestra en la Figura 5.4, que sea lo suficientemente alto como para elevar la lona hasta que permita un flujo adecuado de agua llovida.

Se recomienda el uso de 2 postes, los cuales se pueden simplemente enterrar en el suelo lo suficiente para que se sostenga por sí solos, o bien formar una base de cemento que los amarre de una forma más segura. En la misma línea de acción del techo se deben colocar las amarras (que ya existen en el lugar pero no están bien distribuidas) a ambos lados para ayudar a que no se formen estancamientos. La base de la lona deberá de enterrarse en montículos para evitar estancamientos de agua y fijar todo el sistema.

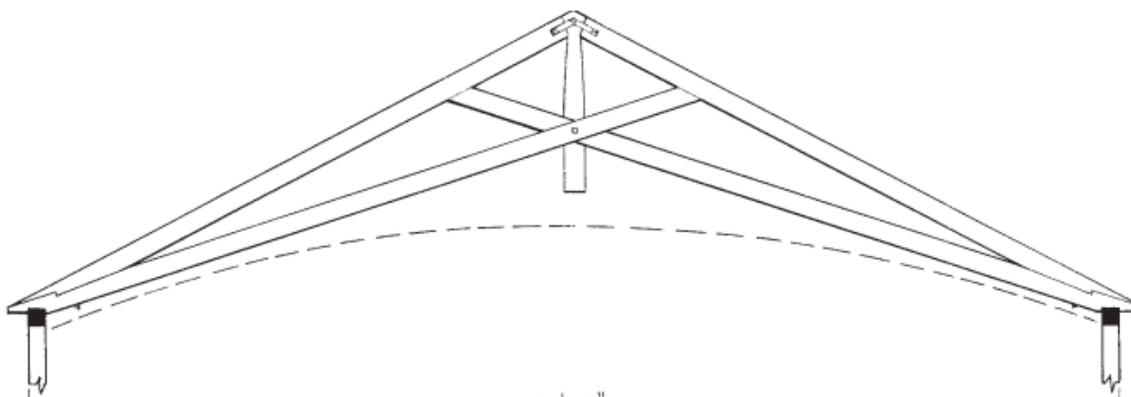


Figura 4.4. Techo de “Tijeras” para el estancamiento del agua sobre la lona (Lewandoski, 2003)

Otro problema encontrado es que los portones externos no tienen ninguna señalización distintiva que informe a los que viven alrededor sobre las sustancias que se están almacenando y el riesgo que estas representan. La lona si tiene una etiqueta donde se explica la información pertinente sobre los PCB's como se muestra en la Figura 4.5, sin embargo esta solo puede leerse por personas dentro del plantel y que estén en frente del sitio de almacenamiento.

Se recomienda que se coloquen rotulaciones en cada portón del plantel con la misma información que viene en la etiqueta utilizada, de manera que las personas que transiten y residan por la zona estén anuentes de lo que se tiene almacenado, ya que es su derecho como ciudadanos tener conocimiento de las sustancias que se encuentran en su vecindario.

Descripción del residuo		Nº de Bulto	Nº de Equipo
DESCRIPCIÓN DEL RESIDUO:	Aceto eléctrico, equipo y materiales contaminados con Bifenilo Policlorado (PCB's)		
GENERADOR:	Compañía Nacional de Fuerza y Luz (CNFL)	Código Peligrosidad según ILO	
CODIGO SIMARDE:	SO206; L-038	930 2315	
GRUPO REACTIVO:	6	GRUPO DE EMBAJAJE:	I Sustancias muy peligrosas.
FECHA:		Clase 2: Peligroso para el medio ambiente	
COMPOSICIÓN FÍSICO-QUÍMICA:	Aceto: Líquido, aceto eléctrico contaminado con PCB's Equipo, materiales: Sólido, metales	Clasificación según UN3077	
PESO TOTAL (kg):		Peligro para el medio ambiente acuático	
VOLUMEN ACEITE (L):		Peligro para el medio ambiente terrestre	
CONC. PCB's (ppm):		Peligro para la salud humana	
EMERGENCIA:	9-1-1, 2295-1612	Peligro para la salud de los organismos acuáticos	
FUGA O DERRAME:	No tocar ni caminar sobre el producto derramado. Destapar la tapa si es posible. Recuperar la mayor cantidad de producto. Absorber por completo los residuos con material absorbente (arena, dióxido y depositarlo en el contenedor adecuado, cerrado y etiquetado).	Peligro para la salud de los organismos acuáticos	
Usos:	Prevenir de gases volátiles como el CO ₂ evitar el contacto con el agua, si se utiliza sin datos químicos de tipo residual y uso común, no contaminar.	Peligro para la salud de los organismos acuáticos	

Figura 4.5. Etiqueta de características y riesgos presente en la lona de protección

Las zonas aledañas al plantel son en su mayoría casas de habitación, y no se avistó ningún punto sensible como hospitales, escuelas, áreas de producción de alimentos o mantos acuíferos. No obstante el alcantarillado de las instalaciones es abierto y se conecta directamente al público, como se puede ver en la Figura 4.6.

Si bien la existencia de este sistema de transporte de agua solamente representa un riesgo leve en caso de una fuga de aceite contaminado, debe tomarse en cuenta la persistencia de los bifenilos policlorados, y como esta característica le ayudaría a desplazarse hasta el alcantarillado en un lapso de tiempo apreciable. Lo anterior es más que nada una observación y por ende no es necesario tomar alguna medida de corrección directa, sino realizar esfuerzos para minimizar el riesgo de fuga o derrame de aceites contaminados.



Figura 4.6. Cercanía del alcantarillado respecto al lugar de almacenamiento

Otra observación pertinente es la cercanía de las residencias y zonas habitadas a la zona de almacenamiento como se muestra en la Figura 4.7. La calle se encuentra a escasos diez metros de la zona de almacenamiento, por lo que una fuga de aceite podría permitir una concentración de PCB's perjudicial para la salud humana. Es por esto que deben impedirse en la manera de lo posible la salida de los aceites de sus contenedores, además de inspecciones lo más frecuentes posibles para determinar el estado de éstos.

Como se puede observar parcialmente en la Figura 4.7, el plantel si está completamente cerrado con púas en la parte de arriba y cuenta con la presencia de un guarda las veinticuatro horas, para así evitar que personas no autorizadas entren al plantel y aumenten el riesgo de contaminación con PCB's. El riesgo de incendio no es elevado debido a que junto a la zona de almacenamiento sólo hay unos transformadores no contaminados que están ordenados en filas, y algunos colocados en el césped de manera aleatoria. El edificio más cercano es la caseta del guardia de seguridad y una zona donde se está construyendo como puede verse en la Figura 4.6, sin embargo estos no presentan riesgo apreciable de incendio por su distancia, materiales constitutivos y volumen ocupado.

El único riesgo leve de incendio es el árbol del cual está sujeta la lona y toda la vegetación seca alrededor de esta, pero la única posibilidad sería fuego provocado o la caída de un rayo, ambas situaciones poco probables. Por lo anterior se concluye que la zona de almacenamiento está protegida de riesgo de incendio, uno de los más peligrosos debido a la posibilidad de formación de compuestos altamente tóxicos y liberación de los PCB's al ambiente.



Figura 4.7. Ejemplificación de la cercanía de la zona de almacenamiento a las zonas pobladas

4.2.1.1. Condiciones para transporte a planta de tratamiento y regeneración

En esta zona se encuentran las condiciones óptimas de transporte, ya que casi cualquier vehículo de carga puede ingresar al plantel donde se encuentran almacenados los transformadores y recolectarlos fácilmente con solo remover la lona que los protege de la lluvia y el viento. Todos los contenedores están estibados en tarimas en buen estado como puede verse en la Figura 4.1, por lo que podrían cargarse al automotor con relativa facilidad con ayuda de un montacargas. Las calles aledañas están en buen estado y no deberían resultar en una dificultad para el transporte hacia la planta, sin embargo es una zona muy poblada y por esto debería de realizarse el viaje en horas de bajo tránsito y bajo las normas asociadas al transporte seguro de materiales peligrosos y protección de las personas involucradas.

Es importante tomar en cuenta que tanto la entrada de agua por la ruptura presentada en la Figura 4.3 como el tiempo de almacenamiento han debilitado la resistencia de los contenedores, en especial el fondo ya que el agua no escurre al suelo por la presencia de la lona de polietileno. Existe la posibilidad de un daño avanzado por corrosión y por ende debe tenerse sumo cuidado a la hora de movilizar y acomodar los recipientes a la hora de prepararlos para el transporte. Los transformadores están diseñados de manera que soporten los efectos climatológicos como el agua de lluvia, pero de igual manera se deben de revisar de manera preliminar a su movimiento. Los barriles si requieren un análisis minucioso para evitar un derrame de un alto volumen de aceite contaminado en la zona y en presencia de varias personas.

4.2.2. Plantel San Rafael

En esta zona se encuentran dos bodegas de almacenamiento con transformadores y barriles con aceite contaminado, además de capacitores que han sido caracterizados como posiblemente contaminados. En esta bodega también se encuentran estibados en tarimas de madera, sin embargo algunos contenedores que presentan un riesgo adicional de fuga de aceite tienen unas pilas de contención secundaria. La disposición interna de la bodega se muestra en la Figura 4.8 donde además se muestra que la zona de capacitores está un nivel arriba del suelo, lo cual está permitido siempre y cuando estén también estibados correctamente.

Como se ve en la imagen las condiciones de almacenamiento son apropiadas en términos de ordenamiento de espacio y protección contra las inclemencias del tiempo, sin embargo esta bodega tiene ciertos detalles que trabajar. Un ejemplo de lo anterior es que su piso no está impermeabilizado, por lo que una fuga de aceite podría fácilmente filtrarse hasta el suelo e inclusive efluentes subterráneos. La bodega cuenta con un muro de contención primario pero con el problema de los suelos este no tiene función alguna, ya que es más sencillo para los aceites filtrarse por el suelo. La solución a esto es el tratado del suelo con una resina epóxicas, de poliuretano u otro material adecuado.



Figura 4.8. Disposición espacial de los contenedores de aceite contaminado en las bodegas

Aunque no todos los transformadores cuentan con bandejas como un medio de contención secundario, cada una de las bodegas tiene un receptáculo en su centro de manera que cualquier fuga sea retenida. Este sitio tiene un volumen apropiado para almacenar más del 125% del volumen de cualquier contenedor ahí almacenado, pero al igual que el muro de contención, no es de mucha ayuda si el piso no está impermeabilizado ni inclinado de modo que cualquier líquido fluya por gravedad al receptáculo. Como se denota en la Figura 4.9, la bodega cuenta con ventilación superior apropiada, ducha y lavajos de emergencia. Los transformadores están debidamente etiquetados con la concentración de PCB's en el aceite contaminado y está techada y cerrada de manera que ninguna persona no autorizada pueda abrir o entrar a la bodega.



Figura 4.9. Condiciones de control de riesgo en las bodegas del plantel de San Rafael

La ubicación de las bodegas dentro del plantel es adecuada respecto a la protección de los trabajadores ya que se encuentra en la parte menos transitada, y a varios metros de cualquier puesto de trabajo. Como puede verse en la Figura 4.10, el lugar de almacenamiento está parcialmente debajo de una colina de tierra por su parte trasera, lo que conlleva tanto a ventajas como desventajas.

Como ventajas se encuentra que esta tierra ofrece protección contra condiciones climáticas como fuertes vientos o lluvias, además de rigidez estructural. Sin embargo esta zona del terreno sirve como bajante de aguas pluviales, y si existe una precipitación importante o varias en un periodo corto de tiempo, existe la posibilidad de inundación de los desagües y la bodega que contiene los transformadores. Esta situación ya ha ocurrido y propicia situaciones de contaminación de efluentes (como el río que pasa a escasos veinticinco metros de la zona) debido a posibles derrames de aceite contaminado presentes en alguno de los métodos de contención secundaria, además de daños y corrosión en los recipientes de almacenamiento dentro de la bodega.



Figura 4.10. Disposición del nivel de suelo de las bodegas

Al igual que en el otro plantel, la zona de almacenamiento está muy cerca de alcantarillado y cuerpos de agua, como puede denotarse en la Figura 4.11. Existen aproximadamente diez metros de distancia entre la bodega y la cerca externa del plantel, donde el terreno baja de nivel apreciablemente hasta el cauce de un río, en una distancia lineal de aproximadamente veinte metros. Por lo anterior existe un riesgo de contaminación del efluente y de las personas que laboran cerca del sitio, si una fuga o derrame permite que los bifenilos policlorados salgan de su contención primaria y secundaria.



Figura 4.11. Posición de la bodega respecto al terreno contiguo

Aunque aquí existe el mismo problema de falta de rotulación que en los demás planteles, en esta zona no es tan importante ya que no existen casas de habitación o zonas de tránsito de personas a cien metros alrededor de las bodegas. En lugar de esto deben aunarse esfuerzos para educar a los trabajadores del plantel para que conozcan el riesgo de los PCB's, sepan a quién acudir en caso de fuga o derrame de aceites y en fin estén capacitados sobre manejo de emergencias relacionadas a estas sustancias.

Existe un riesgo a tomar en cuenta y es una bodega de cilindros de acetileno y gas licuado de petróleo como se muestra en la Figura 4.12, los cuales son altamente explosivos y peligrosos si no se almacenan y manejan con cuidado. Existen por ende dos riesgos principales asociados a los cilindros de gas almacenados, y estos son la toxicidad de las sustancias que se contienen y segundo lo peligroso de tener cilindros a alta presión cerca de zonas de trabajo.



Figura 4.12. Bodega de cilindros que contienen acetileno y LPG

En esta bodega se almacenan varios cilindros tanto de LPG como de acetileno, algunos llenos y otros vacíos, pero como cada uno puede tener una presión de hasta 2200 psi y una inflamabilidad nivel cuatro (según la NFPA 704) son un alto riesgo de incendio para las inmediaciones. Si bien es claro que la bodega donde se encuentran tiene una pared gruesa de material resistente; y se cumple con las reglas de tener a mano la MSDS y rotular todos los contenedores, ésta no es totalmente segura. Con sólo la explosión de un cilindro podría ocasionar una reacción en cadena que podría fácilmente atravesar o destruir las paredes de la bodega, y debido a su cercanía podría alcanzar los transformadores contaminados.

Debido a lo catastrófico que sería la explosión de esta zona de almacenamiento de cilindros de gas y el posible daño o incluso incendio a la bodega de PCB's, se debe evitar a toda costa que esto pueda suceder; haciendo más robusto el sistema de mantenimiento y cuidados. Se recomienda asegurar los cilindros individualmente y no asumir que una cadena puede sostener varios, colocar cerca un equipo adecuado para combatir un incendio de una magnitud tan grave, estar en una constante revisión de las llaves de salida y reguladores, evitar a toda costa cualquier tipo de llama o fuego cerca de la zona, proteger a los cilindros de la luz solar y asegurarse que solo personal calificado maneje y transporte los cilindros ya sea llenos o vacíos.

Cabe destacar que en este plantel se encontraron (con ciertas excepciones mencionadas en este análisis) condiciones óptimas de seguridad laboral y cumplimiento de las normas mínimas, como la aplicación de normas NFPA, fichas de seguridad de sustancias, equipos de emergencia (duchas, lavaojos, entre otros) y en sí rotulación de seguridad y regulación para establecer las mejores prácticas laborales posibles. Cerca de la bodega de bifenilos policlorados se encuentra un sistema de contención de derrames como se muestra en la Figura 4.13, aunque su tamaño implica que dependiendo de la cantidad de aceite liberado puede no ser suficiente a razón de la cantidad máxima de aceite almacenado.



Figura 4.13. Sistema de atención de derrames

Habría que determinar si existe el personal adecuado para manejar este sistema de emergencias, además de si este contiene los materiales necesarios o sólo es útil para derrames de sustancias comunes. Con lo determinado acerca del desconocimiento de los trabajadores acerca de los PCB's es muy probable que ninguno tenga las capacidades para solventar un problema de fuga de aceite contaminado, por lo que la única posibilidad es que se tenga un contrato con una empresa externa

exclusiva para este tipo de emergencia. La dificultad de paso vehicular que se muestra en la Figura 4.14, aunada a la cercanía con el río y todo un ecosistema muestra que aunque lo anterior sea cierto la contención y minimización del derrame sería poco eficiente y conllevaría a una contaminación importante de los alrededores.

Se recomienda entonces la impermeabilización del piso de las bodegas y un programa de sensibilización y capacitación de los trabajadores de la zona para tratamiento de incendios y derrames de PCB's. Además debe de conseguirse un sistema de atención de derrames que pueda tratar un volumen importante de aceite derramado, en caso de que los sistemas de contención no dieran abasto.



Figura 4.14. Calle del plantel que conduce hacia las bodegas de PCB's

4.2.2.1. Condiciones para transporte a planta de tratamiento y regeneración

Aunque en este plantel las condiciones de almacenamiento son mucho mejores a las demás debido a la construcción de las bodegas, el transporte fuera de este es complicado por diversos factores. El primero es la entrada del vehículo de carga a la zona de almacenamiento, ya que está muy alejada de la entrada principal y la calle es relativamente angosta, como puede verse en la Figura 4.14.

Transformadores, piezas de construcción y demás obstáculos podrían impedir el paso de un vehículo de transporte hacia la bodega dependiendo del tamaño de éste, además de que la calle tienen varias curvas de 180 grados que podrían ser difíciles de realizar si el automotor es muy largo. En términos de carga las condiciones son muy similares al plantel en Desamparados, ya que los transformadores y demás contenedores se encuentran sobre tarimas de madera listos para ser

estibados dentro de un camión de carga adecuado, a falta solamente de asegurarlos con cuerdas o cadenas para un transporte seguro. Esta zona también está densamente poblada por lo que un horario especial debe ser establecido de manera que se disminuya en lo posible la interacción con personas y el ambiente en general, y además evitar accidentes o paradas que aumenten el riesgo de derrame o fuga.

En este sitio no hay barriles u otros contenedores con aceite contaminado fuera de los transformadores eléctricos, por lo que no es muy probable que ocurra una fuga en el momento de carga de estos al medio de transporte. Los transformadores están en buenas condiciones estructurales ya que han sido protegidos de las inclemencias climatológicas por la bodega del plantel. No debe tomarse ningún cuidado adicional con estos contenedores a menos que el daño o corrosión sea muy evidente a simple vista.

4.2.3. Plantel Hatillo

Esta zona es la de más alto riesgo, más que nada porque el aceite contaminado está en transformadores de potencia de más de 4000 litros de capacidad y concentraciones de hasta 300 ppm de PCB's. El plantel se encuentra en una zona densamente poblada (centro de San José) como se puede ver en la Figura 4.15, en especial donde se encuentran los transformadores, la sección que ya no se utiliza como sub estación eléctrica.



Figura 4.15. Cercanía de los transformadores contaminados con la vía pública

Por lo expuesto anteriormente, una fuga o derrame en alguno de estos transformadores puede resultar en una contaminación mucho más importante que la de un transformador regular, ya que la concentración en la atmósfera de bifenilos policlorados sería mucho más alta y llegaría a tener contacto con las personas casi de inmediato.

No existe ningún medio de contención primaria o secundaria que retenga el aceite en caso de que este salga del transformador, de manera que las posibilidades de filtración de aceite por el suelo de la zona y su acumulación asociada es bastante alta, convirtiéndose en un riesgo para la salud de las personas que residen en las cercanías del plantel.

Como también se observa en la Figura 4.15, los transformadores cuentan con un sistema de enfriamiento a base de haces de tubos conformados en paralelo de manera que cuando el transformador estuviera trabajando, el aceite pudiera enfriarse por contacto con el aire del ambiente. Estos sistemas de tipo radiador recubren casi todo el ancho del recipiente a excepción del frente donde se encuentran los controladores del equipo, pero al estar conformados de esa manera tienen una resistencia estructural muy baja comparada con la pared del transformador.

El problema principal con lo anterior es que el aceite contaminado además de estar dentro del sistema principal del transformador, recorre todos estos tubos y cualquier tipo de manipulación inadecuada, accidente o imprudencia podría romper uno de estos enfriadores, dejando que una cantidad importante de aceite entre en contacto con la atmósfera externa y la contamine.

La fragilidad de estos tubos es muy alta ya que son muy largos y de un espesor delgado, por lo que cualquier fuerza a lo largo de estos puede causar una deformación que resulte en fractura del metal y un derrame de aceite. Lo anterior, junto a la acumulación de materiales metálicos alrededor de los transformadores, implica un aumento en la probabilidad de accidentes y riesgo de afectación a la salud de los trabajadores de la zona.

Lo expuesto anteriormente se vuelve más peligroso debido al estado de los sistemas de protección contra la entrada de personas no autorizadas al plantel. Aunque en algunas zonas esto está parcialmente controlado con una pared de ladrillo y una malla de metal, como se muestra en la Figura 4.16 las púas no están correctamente distribuidas y los árboles cercanos al plantel permiten un ingreso relativamente sencillo a las instalaciones.,

El otro tipo de malla de protección se muestra en la Figura 4.15, y cómo es observable, su altura no es la adecuada para evitar ingreso de personas externas a la empresa. El plantel cuenta con un guarda las veinticuatro horas pero esto no desestima totalmente el riesgo de vandalismo o conductas inadecuadas dentro del plantel de la empresa.

La situación de las mallas puede generar situaciones de riesgo fuera del ámbito de salud e impacto ambiental, pues esta parte analizada es la entrada para otra zona del plantel. Las personas podrían ingresar fácilmente a lugares de almacenamiento y extraer materiales propiedad de la empresa, incurriendo en pérdidas monetarias para La Compañía.

En general como esta parte del plantel son las antiguas instalaciones de una sub estación eléctrica, se nota que el mantenimiento dado ha sido mínimo o nulo, ya que alrededor de los transformadores hay una gran cantidad de basura y desechos metálicos. Existe además una proliferada vegetación

que acelera el proceso de pérdida de propiedades constitutivas de los transformadores de potencia, afectando su resistencia estructural y demás propiedades. Estas condiciones del plantel se muestran en la Figura 4.17 y parcialmente en la Figura 4.16.



Figura 4.16. Estado de las cercas de protección del plantel Hatillo

Debido a los desechos depositados alrededor de los transformadores, se aumenta significativamente el riesgo de incendio en esta zona del plantel, ya sea por factores externos o internos. Debido al volumen contenido en cada uno de los transformadores, un incendio o explosión de uno de estos tanques se convertiría en una contaminación de un radio bastante elevado de afectación, además de pérdidas millonarias para la empresa en gastos de limpieza, contención y demandas asociadas al accidente.

Los transformadores de potencia están contruidos y recubiertos de manera que estén protegidos de las inclemencias del tiempo, sin embargo las especificaciones están dadas para un equipo en uso, implicando una temperatura más elevada a la ambiente y la circulación de aceite por todo el contenedor. Lo anterior concluye que con el tiempo y las precipitaciones se verán afectadas tanto la estructura como la pintura de recubrimiento, promoviendo la formación de fugas y quiebres estructurales en zonas sensibles como los tubos de enfriamiento.



Figura 4.17. Condiciones del plantel Hatillo respecto a suelos y mantenimiento

Uno de los problemas encontrados en este plantel, y que se encontró en menor cuantía en los anteriores, es la ignorancia de los empleados de la empresa respecto al riesgo asociado de tener contenedores con aceite contaminado con PCB's. Al escuchar e interactuar con algunos de los trabajadores de más alto rango se nota que están informados al menos de forma parcial sobre la toxicidad y peligros de los aceites contaminados, pero a medida que se interactuaba con operarios y personeros de obras civiles (personas más alejadas del área ambiental y del tema de los PCB's) se encontró como no tenían idea de que estas sustancias químicas tan peligrosas estaban tan cerca de su lugar de trabajo, y cómo esto lo ponía en riesgo de enfermedades.

El caso más grave encontrado fue los trabajos de obra civil que estaban realizando trabajadores de la empresa a escasos metros de uno de los transformadores de potencia, con herramienta pesada como el martillo mecánico, incurriendo en el riesgo de perforar uno de los tubos de enfriamiento del aceite como puede verse en la Figura 4.18.

Es imperativo que se realicen campañas de información y educación para todas las personas que trabajan cerca de los sitios de almacenamiento. No necesariamente deben conocer las propiedades químicas y de persistencia de los bifenilos policlorados de una manera técnica y profesional, pero sí conocer el riesgo de un derrame de estas sustancias en el medio ambiente y las consecuencias a la salud debido a contacto directo con concentraciones bajas de PCB's.

En este plantel ocurre lo mismo que en Desamparados, no se tiene ningún tipo de rotulación o aviso en la cerca o paredes de manera que las personas que circulan alrededor tengan conocimiento de las sustancias que contienen estos transformadores de potencia. No es aceptable que las personas de las

cercanías no conozcan acerca de las sustancias que se tienen almacenadas y mucho menos las personas que laboran en la misma empresa, tan cerca de los riesgos asociados. Los transformadores de potencia tampoco cuentan con información acerca de los PCB's que contiene del tipo como el que se muestra en la Figura 4.5, por lo que se entiende que trabajadores ajenos a la sección ambiental no tomen ningún tipo de precaución a la hora de realizar labores cerca de los equipos con aceite contaminado. Como acción inmediata se deben elaborar rotulación con las características e información toxicológica de las sustancias contenidas de un tamaño adecuado, para así informar a los trabajadores del plantel sobre el riesgo asociado a los transformadores de potencia, así como las acciones a tomar en cuenta en caso de derrame o fuga.



Figura 4.18. Utilización de maquinaria pesada cerca de un transformador contaminado

Como recomendación de aplicación inmediata, se deben colocar cintas amarillas con la palabra peligro alrededor de los transformadores de potencia para evitar que personas dentro del plantel se acerquen a ellos y además sepan de los riesgos que allí se encuentran. Luego se pueden utilizar estructuras de protección más efectivas como cercas o paredes de manera que se evite la interacción con los transformadores, permitiendo acceso solamente para revisiones periódicas por personal capacitado. Además es importante contratar un servicio de limpieza y recolección de manera que el metal que cumpla las características se recicle o envíe a chatarrerías, y se eliminen las plantas alrededor de los contenedores de aceite contaminado. Lo anterior es necesario no solo para proteger la integridad física de los transformadores, sino también para facilitar las inspecciones de estos.

Para tener un mejor control del estado de los transformadores, es necesario que alguna persona con conocimientos acerca de PCB's y su almacenamiento realice inspecciones en periodos más cortos de tiempo (como máximo cada semana) o bien capacitar al guarda u otra persona que labore a diario

en este plantel para que inspeccione los contenedores. La capacitación puede ser un curso o bien una inducción rápida sobre los cuidados, riesgos y protocolos de emergencia que existen acerca del almacenamiento de aceites contaminados, partes del equipo que son más sensibles a fugas y ruptura, características básicas de los bifenilos policlorados (bioacumulación, persistencia, entre otras) y las aflicciones a la salud que estos provocan si se encuentran en el ambiente.

4.2.3.1. Condiciones para transporte a planta de tratamiento y regeneración

Este plantel es el que presenta el mayor problema respecto al transporte, ya que los transformadores tienen un peso aproximado de 16000 kilogramos por lo que colocarlos en un vehículo de transporte requeriría de una grúa industrial y un camión que soporte tal carga. Se debe tomar en cuenta además que cualquier intento por mover los transformadores podría resultar en la fractura de uno de los tubos de enfriamiento del aceite, conllevando a una fuga importante de PCB's directamente al ambiente.

Otra forma de realizar el transporte es el trasvase del aceite contaminado en recipientes más pequeños como barriles con las características adecuadas de prevención de fugas. Este método puede ser muy riesgoso debido a que durante el cambio de contenedor pueden ocurrir derrames y accidentes que pueden concluir en exposiciones nocivas a bifenilos policlorados. Al ser tanto volumen de líquido, el vaciado y trasvasado puede convertirse en un proceso largo, tedioso y peligroso. Este debe realizarse con trajes de protección de cuerpo entero, los cuáles pueden ser utilizados sólo por un tiempo determinado antes de presentarse una posible deshidratación.

Observando las opciones de la empresa internacional Machinery zone (2014), se analizó que el peso de cada transformador puede elevarse con ayuda de un montacargas industrial de trabajos pesados. Como ejemplo se cuenta con uno de la marca Kalmar DCE320® los cuales puede manejar hasta 29 toneladas, por lo que son suficientes para elevar estos transformadores y montarlos en un camión o automotor que soporte la carga y pueda transportarla de manera adecuada.

Un ejemplo del transporte de un transformador de potencia se muestra en la Figura 4.19 para uno de un tamaño (y por ende peso) de aproximadamente 250 toneladas. Es importante denotar que este transformador es mucho más pesado que el de la Compañía, pero es un ejemplo de las condiciones que podrían necesitarse para transportar un equipo de gran peso y proporciones.

En la Figura 4.20 se muestra el montaje inferior de los transformadores de donde se pueden elevar con la ayuda del montacargas, conformado con dos barras metálicas en la base del equipo, donde éste es rígido y puede utilizarse como medio de apoyo y así no esforzar los tubos de enfriamiento con amarras u otro tipo de sistema para cargarlo a un camión de transporte.

Tanto la empresa adjudicada como la Compañía deben aunar esfuerzos para obtener este montacargas (ya deben existir contactos debido a que se debió utilizar uno cuando se colocaron los transformadores de potencia en este plantel) y con esto lograr transportarlos a la planta de tratamiento. Se debe tomar en cuenta que son una carga sumamente peligrosa y por ende deben tomarse todas las previsiones del caso ya antes mencionadas para minimizar el contacto con las personas y el medio ambiente en la manera de lo posible.



Figura 4.19. Transporte de un transformador de potencia por vía pública (U.S Department of Energy, 2012)



Figura 4.20. Disposición de la base de los transformadores de potencia

Como se expone en el capítulo 5 del presente trabajo, el transporte de estos transformadores en alguno de los dos vehículos de la empresa no es posible, ya que el camión de mayor capacidad puede cargar a lo sumo siete toneladas y media, mientras que cada transformador ronda las dieciséis toneladas. La única opción viable es el trasvase del aceite a contenedores de menor peso y volumen, realizándolo con la mayor precaución posible, y atañéndose a las regulaciones y características del transporte de los barriles con aceites contaminados.

La cantidad de barriles necesarios se calcularán en el análisis de transporte, ya que se cuenta con la cantidad de litros en cada transformador de potencia y la capacidad nominal de los barriles a utilizar, siendo esta última de 208 litros (Air Sea Containers , 2005).

Las recomendaciones establecidas deben analizarse y aplicarse lo más pronto posible, ya que el riesgo asociado (tanto en el ámbito legal como el ambiental) actualmente no es tolerable. La empresa encargada del proceso tiene planeado el transporte de todos los contenedores a sus instalaciones, pero esto no sucederá hasta que se cuente con todos los permisos relacionados a la implementación correcta del proceso en el país. Como se analizó en el capítulo 3, este período puede extenderse inclusive en ámbito de meses, por lo que es admisible utilizar capital de la Compañía para mejoras de los sitios de almacenamiento.

CAPÍTULO V: ANÁLISIS DEL TRANSPORTE DE LOS ACEITES CONTAMINADOS

Una de las fases más importantes del proceso que se va a realizar es el transporte de los aceites contaminados desde sus zonas de almacenamiento hasta el sitio donde se realizará la dechlorinación y regeneración de estos. Ya sea dentro de un transformador o algún otro contenedor donde haya sido trasvasado, el aceite debe recorrer una gran parte del territorio nacional siguiendo las regulaciones que existen en el país al respecto. El objetivo de esto es evitar que un derrame u accidente produzca un vertido peligroso de bifenilos policlorados al ambiente.

5.1. Capacidad de transporte de la Empresa

La Empresa a la que se le adjudicó este proceso utilizará dos automotores para realizar todo el proceso de transporte, ambos catalogados como furgón (carrocería) en el permiso de pesos y mediciones (el cuál se encuentra al día para ambos automotores), y con una carga útil de 7,5 y 3 toneladas. Ambos vehículos y sus respectivos choferes están autorizados por La Contraloría del Ambiente del Ministerio de Ambiente y Energía para realizar el traslado de sustancias peligrosas además de que cuentan con la revisión técnica vehicular al día. Los vehículos presentaron una falta leve al código de transporte de sustancias peligrosas en términos de instalación eléctrica defectuosa, no protegida contra la intemperie y la falta de una conexión rápida de emergencia para la batería.

5.1.1. Conocimientos y habilidades requeridos del conductor

Es imperativo que el chofer del transporte tenga los conocimientos básicos de atención de emergencias químicas tal y cómo se exponen en las fichas de seguridad de las sustancias y la guía de respuesta ante emergencias de la ONU. Este documento brinda gran cantidad de información acerca del tipo de peligro asociado a las sustancias, además de las acciones a tomar basado en los números de emergencia y rombo de seguridad.

5.2. Análisis de la legislación nacional para el transporte de sustancias peligrosas

Existen varias instituciones en el país que regulan el transporte de sustancias a través del territorio nacional, entre estas el Ministerio de Obras Públicas y Transportes, Ministerio de Ambiente y Energía y el Ministerio de Economía, Industria y Comercio. El reglamento más importante es el 24715 MOPT-MEIC-S publicado en La Gaceta en Noviembre de 1995, y que define los lineamientos y requerimiento mínimos para transportar sustancias catalogadas como peligrosas por el Ministerio de Salud, de manera que no presenten un riesgo importante para la salud de las personas involucradas.

5.2.1. Documentos necesarios para el transporte

En resumen, y siguiendo lo expuesto en el Reglamento 24715 para el transporte de Productos Peligrosos (2010), los documentos obligatorios que un automotor debe tener para realizar un transporte de sustancias peligrosas son las siguientes:

5.2.1.1. Ficha de emergencia para el transporte de materiales peligrosos

Documento que contiene toda la información físico-química de las sustancias, toxicidad inherente, respuesta a situaciones de fuga o contacto con estas y demás información importante en caso de un

accidente o derrame. Es importante que esta ficha esté valorada y firmada por un profesional responsable en el campo de la química o ingeniería química.

La ficha de emergencia es uno de los documentos más importantes con los que debe contarse, ya que junto al manifiesto de transporte conforman la información de primera mano, como el protocolo de emergencias a seguir para minimizar los efectos de impacto ambiental en caso de un derrame o fuga de la sustancia que se transporta.

5.2.1.2. Permiso de Pesos y Dimensiones otorgado por Consejo Nacional de Viabilidad

Documento donde se especifican las características principales del automotor y su capacidad máxima de peso transportable. En específico se muestran las dimensiones totales del vehículo (cabina y contenedor), distancia entre eje(s) y de ser necesarias las dimensiones del remolque que utiliza. El permiso es otorgado por Unidad de Análisis administrativo del Departamento de Pesos y Dimensiones del CONAVI, y tiene una vigencia de 5 años.

5.2.1.3. Revisión técnica vehicular

Documento otorgado por la compañía Riteve S y C (la misma empresa que realiza la revisión del automotor) y autorizada por el COSEVI. Regulación común en Costa Rica donde se especifica que el automotor en cuestión cumple con las características mecánicas y físicas para transitar por las carreteras nacionales, mediante una revisión detallada del vehículo por expertos en mecánica automotriz.

5.2.1.4. Autorización de La Contraloría del Ambiente del MINAE

Consta de un permiso que brinda La Contraloría del Ambiente tanto para los vehículos que servirán de transporte de las sustancias peligrosas como para los conductores que los utilizarán, además de definir los requisitos mínimos necesarios. Esta institución es la responsable principal de brindar autorización para la generación de residuos peligrosos en las empresas y por ende la organización de principal competencia en este tema.

5.2.1.5. Manifiesto para el transporte de desechos peligrosos

Generado por un regente químico y siguiendo los lineamientos expuestos en el Reglamento 27001 para el manejo de los desechos peligrosos industriales (1998). El documento consta de una página donde se tiene la información general tanto de la empresa generadora como la transportista, características físico-químicas, cantidad y peligrosidad del desecho que se va a movilizar, instrucciones de manipulación y manejo, sitios de salida y llegada, tipo de embalaje e información general acerca de protocolo para emergencias como derrame de las sustancias transportadas.

5.2.2. Requisitos físicos necesarios para el transporte de sustancias peligrosas

Basándose nuevamente en lo expuesto en el Reglamento 24715 para el transporte de Productos Peligrosos (2010) y las recomendaciones establecidas por el Departamento de transporte de los Estados Unidos (2012) las rotulaciones y equipamiento que un automotor debe tener para realizar un transporte de sustancias peligrosas se exponen a continuación.

5.2.2.1. Placa de rombo de identificación

Se define según el material peligroso transportado, con la clasificación emitida por Las Naciones Unidas como se muestra en la Figura 5.1. Se debe colocar en la esquina superior derecha de la parte posterior del contenedor o cajón, en el centro de cada uno de los costados y en la parte frontal lateral derecha del automotor, a media altura.



Figura 5.1. Rotulación aprobada por la ONU para el transporte de sustancias peligrosas (U.S. Department of transportation, 2012)

5.2.2.2. Placas con número de riesgo y código de identificación del material

Son rotulaciones donde se colocan los números específicos del material que se está transportando y se separan por una línea a la mitad, como se muestra en la Figura 5.2. Deben confeccionarse con las letras en color negro sobre un fondo color anaranjado, colocándose debajo del rótulo en forma de rombo mencionado anteriormente.

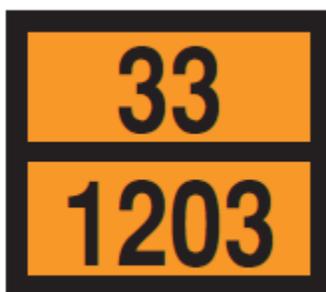


Figura 5.2. Rotulación de transporte con el número de identificación de las Naciones Unidas y del riesgo inherente a la sustancia (U.S. Department of transportation, 2012)

La cifra de la parte superior se denomina número de identificación de riesgos y está relacionado con las regulaciones Europeas y sudamericanas, y están asociadas a un peligro inherente de la sustancia según la lista siguiente, para la mayoría de los casos:

2-Emanación de gases resultantes de presión o reacción química

3-Inflamabilidad de sustancias líquidas y gases o materia líquida susceptible al auto calentamiento

4-Inflamabilidad de materia sólida o sustancias sólidas susceptibles al auto calentamiento.

5- Oxidante

6-Toxicidad o peligro de infección

7-Radiactividad

8-Corrosividad

9-Peligro de reacción violenta espontánea.

Como reglas generales se tiene que si el número se repite es una señal de mayor intensidad del riesgo, si la materia tiene un solo riesgo este es seguido por un cero y si reacciona violentamente con el agua se coloca una “X” antes de las cifras mencionadas anteriormente. Se tendrá entonces un código de X2389 para el sodio en dispersión de aceite mineral y de 369 para el aceite contaminado, tomando en cuenta las propiedades compuestas para ambas mezclas.

Las cifras de la parte inferior son el número de identificación de las Naciones Unidas y siempre consta de cuatro dígitos. Para los aceites contaminados con bifenilos policlorados se tiene el código 2315 y el sodio metálico (mencionado solamente como sodio) el 1428.

5.3. Atención de emergencias

Como se mencionó anteriormente, la información físico-química de las sustancias es imperativa para realizar un transporte responsable de sustancias peligrosas. Se recopilará la información pertinente a la atención de emergencias para cada sustancia peligrosa a transportar, de manera que se tenga lo necesario para la formulación de las fichas de transporte.

Se utilizará el código de peligrosidad que se muestra en el Cuadro 5.1, generado por la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (2005) para la definición de las sustancias según sus propiedades relacionadas a sus efectos adversos. Para los criterios de clasificación para grupos de embalaje/envases se utilizarán los establecidos por las Naciones Unidas (2011).

Cuadro 5.1. Código de peligrosidad de los residuos y demás sustancias químicas

Características	Código de Peligrosidad de los Residuos (CPR)
Corrosividad	C
Reactividad	R
Explosividad	E
Toxicidad	T
Toxicidad ambiental	Te
Toxicidad aguda	Th
Toxicidad crónica	Tt
Inflamabilidad	I
Biológico-Infecioso	B

Además de la información que se presentará a continuación, se debe de conseguir información relativa a legislación del país, como teléfonos de emergencia (empresa, Comisión Nacional de

Emergencia, servicio de atención de emergencias y comisión de intoxicaciones), número de registro en el Ministerio de Salud y la información básica del responsable que generó la ficha de transporte con la autorización del Colegio correspondiente.

Finalmente se tiene un apartado de las acciones generales a realizar en caso de accidente, donde se colocan los lineamientos según la peligrosidad de las sustancias transportadas. Utilizando la información suministrada por el Departamento de transporte de los Estados Unidos (2012) se genera el siguiente procedimiento:

Aproximarse al incidente con viento a favor, cuesta arriba o río arriba, manteniéndose alejados de vapores, humos y derrames. Luego debe de aislarse el área y evacuar a las personas que no tomarán acciones correctivas, todo esto utilizando el equipo de protección adecuado. Luego se debe de llamar inmediatamente a las organizaciones de emergencia pertinentes y tomar acciones de mitigación como se mencionan en la parte de riesgos de la ficha de transporte.

5.3.1. Aceite contaminado con bifenilos policlorados

Primeramente se tiene la información general y de caracterización del producto peligroso, para luego definir las características de intoxicación de las sustancias y las acciones de atención médica correspondiente. La información pertinente se obtuvo de la ficha de seguridad aceptada por La Compañía dueña del aceite que debe tratarse y formulada por Barquero (2012), a menos que se indique lo contrario o se utilizara conocimiento adquirido en otros capítulos.

1-Fórmula: No puede definirse, ya que es una mezcla compuesta de hidrocarburos.

2-Código UN: 2315

3-Código de CAS: 64742-53-6 (destilados nafténicos ligeros de petróleo, hidrogenados), 64742-46-7 (destilados nafténicos medios de petróleo, hidrogenados) y 1336-36-3 (bifenilos policlorados, mezcla de congéneres).

4-Código de peligrosidad: RETHI

5-Grupo de envase/embalaje: Tipo II por material inflamable con temperatura de inflamación por encima de 23 °C y tipo II por sustancias de clasificación 9 (peligrosidad variada), por lo que se definirá como tipo II.

6- Simbología ONU: A razón de los riesgos específicos determinados para la sustancia, se debe especificar la señalización como se muestra en la Figura 5.3, según las normas establecidas por la ONU (U.S. Department of transportation, 2012).



Figura 5.3. Simbología ONU para el aceite contaminado con bifenilos policlorados

7-Estado y aspecto físico: Líquido incoloro o de color ámbar (en caso de haber sido utilizado por mucho tiempo y ser afectado por la oxidación).

8-Número de guía de respuesta en caso de emergencia: 171

9-Propiedades particulares: Aceite dieléctrico de transformador.

10- Equipo de protección personal: Debe utilizarse respirador de cara completa y doble filtro comprobado para vapores orgánicos, guantes de nitrilo, gafas de seguridad o mascar completa, botas resistentes a productos químicos y traje completo tipo Tyvek. Cabe destacar que todos los sistemas a excepción de los guantes dependen del nivel de exposición del trabajador con el aceite contaminado.

11-Incompatibilidades: Oxidantes fuertes, altas temperaturas, fuentes de calor o ignición y condiciones de humedad.

12-En caso de fuga: Utilizar el equipo de protección adecuado, evacuar el área y ventilarla. Se debe intentar detener la fuga siempre y cuando esto no implique un riesgo, y eliminar cualquier fuente de ignición de los alrededores. Contener y absorber el líquido con material inerte (arena por ejemplo) y transferir este residuo a un contenedor metálico que pueda sellarse por completo. Cabe destacar que nunca debe dispersarse el derrame con agua, permitir que la sustancia entre a un alcantarillado o efluente y proceder a descontaminar el sitio por completo.

13-En caso de fuego o incendio: Utilizar equipo completo de protección, incluyendo equipo de respiración de presión positiva. Tener a mano extintores de polvo químico o dióxido de carbono y no utilizar agua a menos que sea necesario. Evitar a toda costa los vapores químicos generados ya que sumamente tóxicos e irritantes.

14-En caso de contaminación: En caso de contacto con suelos, se debe de calcular la propagación de este respecto al tiempo transcurrido, para determinar si se debe realizar una biorremediación in situ o excavar y transportar el material sólido hasta su lugar de tratamiento. Si se trata de contaminación de mantos acuíferos se debe de contactar inmediatamente con el responsable de la empresa, para que se apliquen las técnicas de remediación lo más antes posible.

15-Intoxicación: se tienen tres maneras distintas para desarrollarse un efecto sobre el cuerpo, ingestión, inhalación y contacto directo con piel y ojos. Deben conocerse las vías de transporte y propiedades toxicológicas de la sustancia de manera que se tenga una idea de cómo puede afectar a una persona.

- Ingestión: Se pueden presentar síntomas de irritación del tracto gastrointestinal, malestar abdominal, náuseas, vómito y diarrea. Los PCB's pueden absorberse y bioacumularse en el cuerpo receptor y atacar órganos específicos.
- Inhalación: Los vapores orgánicos pueden causar irritación en las vías respiratorias y producir tos y dificultad para respirar, dolor de cabeza, somnolencia y náuseas. Los PCB's pueden bioacumularse como en el apartado anterior.
- Contacto con piel y ojos: En contacto directo se pueden producir irritación, además de absorción y bioacumulación como en los casos anteriores. Para el caso de la piel pueden

generarse efectos severos como dermatitis y cloracné, por lo que debe evitarse el contacto en la manera de lo posible.

16-Atención médica: se deben establecer los métodos de primeros auxilios concernientes a cada tipo de intoxicación posible, de manera que se puedan tratar las personas afectadas en el sitio del incidente hasta que pueda obtenerse ayuda médica profesional.

- Ingestión: No inducir al vómito a menos que el personal médico lo indique, y si se produce involuntariamente mantener la cabeza del afectado por debajo del nivel de las caderas. No suministrar nada por vía oral si la persona está inconsciente y obtener asistencia médica inmediatamente,
- Inhalación: Utilizar equipo de protección para ingresar a la zona del incidente y trasladar a la víctima a un lugar ventilado. Si se cuenta con dificultad para respirar permitir que alguien capacitado brinde resucitación cardio-pulmonar u oxígeno suplementario, en caso contrario colocar a la persona en posición de recuperación.
- Contacto con piel y ojos: Lavar el área afectada con abundante agua (y jabón en caso de la piel) por varios minutos hasta no presenciar residuos de la sustancia. En caso de que la irritación persista por un tiempo importante, obtener atención médica adecuada.

17-Advertencias especiales: Producto considerado como persistente en el medio ambiente, y capaz de bioconcentrarse en cadenas alimenticias. Debe evitarse en la manera de lo posible que tenga contacto con los seres vivos y su entorno.

5.3.2. Dispersión de sodio metálico en aceite mineral

Se analizarán las propiedades generales de ambas sustancias y se escogerá las de mayor intensidad y afectación, para obtener los riesgos y condiciones de peligrosidad de la mezcla como un todo. La mayoría de la información se obtuvo de Sigma Aldrich (2013) a menos que se indique lo contrario, o utilizando la información determinada en otros análisis.

1-Fórmula: Na^0 , mezcla compuesta de hidrocarburos en su mayoría nafténicos.

2-Código UN: 3189

3-Numero de CAS: 7440-23-5 para el sodio metálico y 64742-53-6 para el aceite mineral.

4-Código de peligrosidad: CRET1.

5-Grupo de envase/embalaje: Tipo III (sustancias que en contacto con agua emiten gases inflamables).

6-Simbología ONU: A razón de los riesgos específicos determinados para la mezcla de sustancias del producto, se debe especificar la señalización como se muestra en la Figura 5.4, según las normas establecidas por la ONU (U.S. Department of transportation, 2012).



Figura 5.4. Simbología ONU para el sodio metálico en dispersión de aceite mineral

7-Estado y aspecto físico: Sustancia plateada granulada dentro de un líquido incoloro.

8-Número de guía de respuesta en caso de emergencia: 138

9-Propiedades particulares: Reactivo químico.

10- Equipo de protección personal: Utilizar anteojos de seguridad y un protector de rostro según las regulaciones internacionales (NIOSH por ejemplo), además de utilizar guantes de protección. Protegerse el cuerpo con un traje completo resistente a los químicos y retardante de llama y es recomendable utilizar un respirador tipo N100 o P3.

11-Incompatibilidades: Según la Facultad de Química de la Universidad Nacional Autónoma de México (2008) a manera general el sodio es incompatible con agentes oxidantes, agua y ácidos. El vapor de sodio puede reaccionar con carbón en polvo y es incompatible con clorobenceno y benceno inclusive en ambientes inertes con nitrógeno.

12-En caso de fuga: Utilizar el equipo de protección completo, no inhalar vapores o gases que procedan del derrame y evacuar el área lo más rápido posible. Detener la fuga de ser posible de manera segura y no permitir que tenga contacto con ningún cuerpo de agua. Se puede retener con carbonato de sodio u otro tipo de polvo seco y almacenar en un contenedor que pueda sellarse completamente.

13-En caso de fuego o incendio: Utilizar extintores de polvo seco y nunca agua, debido a la reactividad del material con esta. Utilizar un respirador completo de presión positiva en todo momento y asegurarse que no existe riesgo de explosión de un contenedor antes de intentar apaciguar las llamas.

14-En caso de contaminación: Para el caso de contaminación de un manto acuífero, lo indicado es alejarse del sitio debido al riesgo inminente de explosión, y comunicarse con un experto para la remediación posterior de los productos de reacción. Lo anterior también aplica para la contaminación del aire con la formación de gases o vapores de sodio.

Para la contaminación del suelo, debe de analizarse la dispersión del aceite mineral para determinar el método de remediación, al mismo tiempo que se agrega carbonato de sodio u otro polvo seco para retener el sodio metálico. Se debe de contactar un experto para que efectúe la técnica de remediación adecuada.

15-Intoxicación: se tienen tres maneras distintas para desarrollarse un efecto sobre el cuerpo, ingestión, inhalación y contacto directo con piel y ojos. Deben conocerse las vías de transporte y propiedades toxicológicas de la sustancia de manera que se tenga una idea de cómo puede afectar a una persona. La información de este apartado se obtuvo de la Facultad de Química de la Universidad Nacional Autónoma de México (2008).

- Ingestión: A pesar de encontrarse en dispersión de aceite mineral, el sodio metálico puede producir quemaduras severas en la boca y tracto digestivo, presentándose dolor abdominal y en ocasiones vómito.
- Inhalación: Los vapores generados son altamente irritantes para la nariz y garganta, causando tos, dificultad para respirar e inclusive edema pulmonar. Se pueden generar efectos severos en las fosas nasales y laringe a concentraciones específicas de vapor de sodio.
- Contacto con piel y ojos: al contacto con la piel puede generarse primeramente irritación por el aceite mineral, y luego quemaduras térmicas y cáusticas. El contacto con los ojos puede generar irritación, quemaduras severas e inclusive ceguera. Los vapores pueden producir irritación en piel, ojos y mucosas.

16-Atención médica: se deben establecer los métodos de primeros auxilios concernientes a cada tipo de intoxicación posible, de manera que se puedan tratar las personas afectadas en el sitio del incidente hasta que pueda obtenerse ayuda médica profesional.

- Ingestión: Definitivamente no inducir el vómito, y en caso de que este se dé involuntariamente, colocar la cabeza por debajo del nivel de la cintura. Si la persona se encuentra inconsciente no tratar de hacerlo ingerir algo, pero si se encuentra despierta remojar su boca con agua y llamar a un profesional de emergencias.
- Inhalación: Movilizar a la persona afectada a un lugar ventilado y fuera del contacto con los vapores generados, y administrar respiración artificial en caso de que la persona no esté respirando. Si la persona se encuentra consciente, mantenerla en condición de reposo hasta que llegue la atención médica profesional.
- Contacto con piel y ojos: en caso de contacto con los ojos, lavar con agua por al menos quince minutos o hasta detener la irritación, y luego consultar a un médico. En caso de contacto con la piel, se deben retirar la ropa contaminada y eliminar los restos de la sustancia para luego lavar profusamente con agua y jabón. Si se producen quemaduras en la piel debe contactarse a un médico lo más pronto posible.

17-Advertencias especiales: A pesar de encontrarse en dispersión de aceite mineral, el sodio puede reaccionar violentamente con el agua e inclusive la humedad ambiental, generando gas hidrógeno que puede explotar con solamente la energía producida en la reacción. No permitir por ningún motivo que tenga contacto con agua o humedad y tratar los derrames con la mayor celeridad que sea posible.

5.4. Sustancias peligrosas a transportar

La parte más importante a la hora de realizar un análisis de cómo transportar una sustancia peligrosa de un lugar a otro es la identificación y caracterización de la sustancia en sí, de manera

que se sepa con la mayor certeza los riesgos y condiciones a los que se tendrá exposición durante el proceso completo de transporte.

5.4.1. Aceite contaminado con bifenilos policlorados

Es la sustancia más importante a transportar por la cantidad que se piensa movilizar, la diversidad de contenedores y condiciones en las que se encuentra almacenado, la peligrosidad asociada a los compuestos orgánicos persistentes y lo complejo que es el tratamiento de un derrame de estos al medio ambiente. A continuación en el Cuadro 5.1 se muestra el inventario de transformadores eléctricos en cada uno de los sitios de almacenamiento (sin tomar en cuenta los de potencia en el plantel Hatillo y plantel Guadalupe) y los contemplados que todavía se encuentra conectados a la red eléctrica nacional, a razón de su capacidad en KVA y la cantidad correspondiente.

Cuadro 5.2. Inventario de los transformadores eléctricos con aceite contaminado con PCB's

Capacidad (KVA)	Plantel San Rafael	Plantel Desamparados	Transformadores en red eléctrica
5	5	2	-
10	9	22	4
15	30	23	6
25	35	52	17
37,5	2	3	-
50	31	18	20
75	10	18	4
100	5	7	1
167	3	-	3
Total	130	145	55

Como se mencionó en el capítulo anterior, en el plantel de Desamparados se tienen 14 barriles con aceite contaminado, proveniente de algunos de los transformadores de esta área. Luego de la inspección se denotó que son contenedores de tamaño estándar, el cual según la Empresa Air Sea Containers (2005) tiene dimensiones de 0,585 m x 0,88 m y está aprobado por las Naciones Unidas (código 1A1) para el transporte de materiales peligrosos. Según García y Prado (2008) el tipo de tarima más utilizada en América (denominada universal) tiene dimensiones de 1000 x 1200 milímetros, por lo que se podrán colocar un máximo de 2 barriles por tarima utilizada.

La empresa que realizará el proyecto tiene contemplado el trasvase del aceite de los transformadores de potencia en barriles metálicos del tamaño antes mencionado. En el Cuadro 5.2 se muestra la cantidad de aceite contenido en los transformadores de potencia, y los barriles equivalentes a razón de su volumen máximo de almacenamiento.

Cuadro 5.3. Volumen de aceite para los transformadores de potencia y equivalente de barriles

Transformador eléctrico	Cantidad de aceite (L)	Barriles necesarios
Transformador #1 Hatillo	4403	22
Transformador #2 Hatillo	4403	22
Transformador #3 Hatillo	4417	23
Transformador Guadalupe	1776	9
Total	15299	75

5.4.2. Materiales contaminados con bifenilos policlorados

Muy similar a lo expuesto anteriormente, son los residuos del núcleo de los transformadores, materiales utilizados para tratar derrames puntuales durante el proceso de descontaminación y regeneración de los aceites o bien objetos contaminados de manera importante en alguno de los procedimientos relacionados con PCB's. Estos materiales se piensan colocar en recipientes cilíndricos apropiados para su exportación a una empresa extranjera con la tecnología y capacidad para tratarlos, por lo que deben pasar por un proceso de transporte hacia el puerto asignado para su embarque.

5.4.3. Dispersión de sodio metálico

Otra de las sustancias que deben ser transportadas hacia el sitio para la declorinación, debido a que se piensa importar este insumo. Esta sustancia también implica un procedimiento de transporte especial, ya que aunque su toxicidad no es muy elevada, la reactividad con el agua (incluyendo la humedad del ambiente) implica que una fuga o derrame es una situación de alto riesgo dependiendo de su magnitud.

La dispersión de sodio que se planea utilizar viene en contenedores cilíndricos concéntricos, donde se tiene un barril interno con el reactivo en dispersión de aceite mineral y el barril externo (con las dimensiones estándar mencionadas anteriormente) que protege todo lo contenido. Esta distribución se realiza con el fin de agregar una solución de arena en el espacio restante dentro del barril externo, de manera que si se presenta una fuga de sodio esta sea absorbida por este material y no permita que tenga contacto con la atmósfera húmeda.

En el momento en que el sodio va a ser utilizado, se sustrae el barril interno de la arena y se coloca en su posición dentro del área de proceso; puesto que el riesgo de ruptura o fuga se atribuye solo al proceso de transporte tanto nacional como internacional. El barril se conecta a la entrada de nitrógeno gaseoso para forzar su salida por desplazamiento másico, además de colocarse sobre una balanza para determinar la cantidad de dispersión restante en el contenedor.

5.5. Análisis de embalaje, carga y descarga

La tarea más crítica en términos de transporte de sustancias peligrosas es la preparación de los contenedores para minimizar el riesgo de derrame durante la movilización, y tanto la carga como la descarga de estos al automotor. En términos de la minuciosidad y acatamiento de las regulaciones establecidas para este proceso es que se define la probabilidad de un derrame o riesgo asociado que ponga en peligro la salud y vida de las personas involucradas.

Debido a que varios de los planteles mencionados no cuentan con un montacargas y/o existe la dificultad de organizar un horario definido de viajes con meses de antelación, la empresa a cargo del proceso decidió utilizar el automotor pequeño (Dyna®) para transportar su propio montacargas. Es por lo anterior que se cuenta solamente con el camión de mayor tamaño para el transporte de los contenedores. A pesar de lo anterior se analizarán ambos casos (con y sin la disponibilidad del

Dyna®) de manera que se muestre el caso actual y el más eficiente, para poder tener la perspectiva de cada posibilidad y los beneficios particulares.

5.5.1. Capacidad volumétrica de carga y tonelaje de los automotores

Debido a la gran cantidad de materiales a transportar, es importante determinar la capacidad general de cada automotor, de manera que la movilización (en especial los transformadores eléctricos) se realice de manera eficiente. Como se mencionó anteriormente la empresa cuenta con dos automotores tipo furgón los cuales deben caracterizarse lo mejor posible, de manera que se aproveche su capacidad al máximo pero respetando las normas de seguridad asociadas al material que se transporta y las propiedades estructurales de cada vehículo.

Tomando en cuenta la altura promedio de los transformadores que se encuentran almacenados, se pensó en una posible adaptación en los cajones de los camiones de manera que se pudiera almacenar el doble de contenedores y así duplicar la eficiencia de cada automotor. La idea anterior se descartó ya que según Barquero (2014) los transformadores y demás contenedores con residuos peligrosos deben transportarse a un solo nivel, ya que disminuye el riesgo de fuga. Además de lo anterior se realizaron cálculos en campo y se determinó que la capacidad del automotor era apenas suficiente para el peso de los transformadores a toda capacidad.

5.5.1.1. Camión modelo Toyota Dyna®

Según la Unidad de análisis administrativos del CONAVI (2013) se muestra que este automotor es del año 1991 y tiene una capacidad máxima segura de 3,5 toneladas. Además tiene un largo total de 5,78 m, un ancho de 2,33 m y una altura de 3,1 m. Debido a lo anterior se determina que las tarimas deben colocarse con su lado menor (un metro) en dirección de la salida. Con esta configuración se estima un máximo de tres filas de tarimas a lo largo, por lo que finalmente se pueden transportar un total de 6 tarimas en este automotor.

5.5.1.2. Camión modelo International 4300®

Como definió la Unidad de análisis administrativos del CONAVI (2013) este camión es modelo 4300 del año 2006, y una carga útil de 7,5 toneladas. Tiene un ancho de 2,46 m por lo que se puede colocar el lado mayor (metro y veinte centímetros) en dirección a la salida. Según la empresa Budget Truck Rental (2014) se muestran la altura dentro del contenedor es de 2,43 m, mientras que la longitud interna es de 7,26 m. Debido a la información anterior se puede determinar que el máximo de tarimas transportables por este automotor es 14.

5.5.2. Transporte de transformadores y demás contenedores de aceite contaminado

El embalaje de los transformadores es la etapa crítica de este análisis, debido a que su tamaño (volumen y área transversal) varía según su capacidad de potencia (kVA). La empresa a cargo del proyecto estandarizó los transformadores a partir de su potencia y relacionó esta con las dimensiones (mm) de cada transformador como se muestran en el Cuadro 5.3. Se define un área y volumen rectangular equivalente a razón del espacio mínimo que ocuparía el transformador sobre la tarima como se indica en la Figura 5.3. Además de lo anterior se define la cantidad de aceite que contiene cada transformador tanto en litros como en kilogramos. El método se definió ya que las

dimensiones específicas de cada transformador pueden variar según el fabricante y el modelo, por lo que era necesario de alguna manera normalizar su tamaño para los cálculos de embalaje.

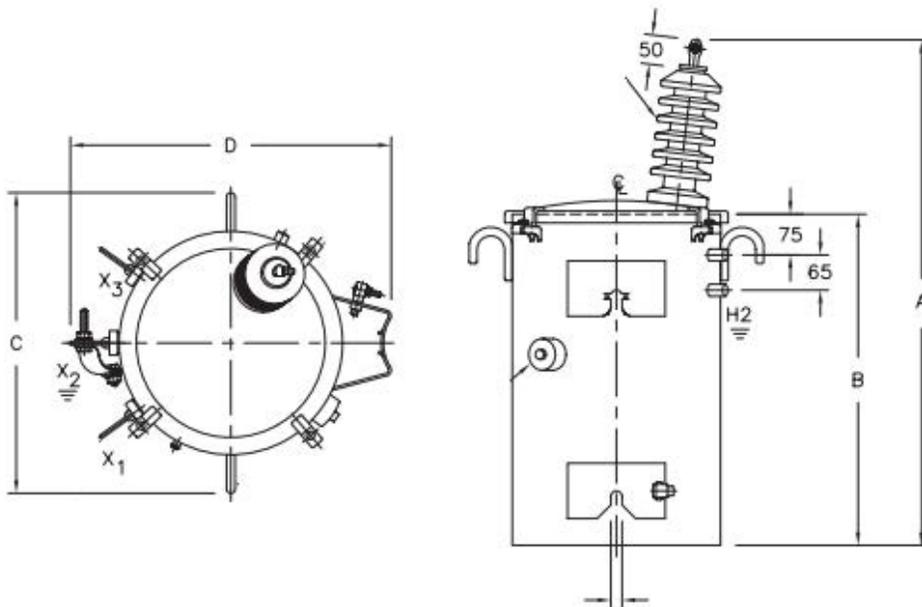


Figura 5.5. Dimensionamiento de un transformador eléctrico para embalaje

Cuadro 5.4. Constantes para la relación empírica de dimensionamiento de los transformadores

Potencia (kVA)	A (mm)	B (mm)	C (mm)	D (mm)	Masa (kg)	Volumen (L)
10	885	560	500	525	100	22
25	935	610	560	590	160	30
50	1035	710	635	675	260	60
75	1035	710	745	840	375	90
100	1135	815	770	965	555	100
167	1335	1015	795	890	690	160

Como se muestra en el Cuadro 5.1, La Compañía tiene almacenada transformadores de 5, 15 y 37,5 kilovatios con aceite contaminado, de los cuales no se cuenta con las constantes necesarias para definir su volumen y área transversal. Se utilizará entonces el método de spline cúbico (cercha) para determinar estos valores a razón de los demás datos, asumiendo que las constantes siguen un comportamiento estable y definido. En el Cuadro 5.4 se muestran las dimensiones y valores para masa y volumen de aceite que se obtuvieron luego de la aplicación del método de interpolación polinomial.

Cuadro 5.5. Constantes obtenidas por método spline cúbico para los transformadores de 5 y 37,5 kilovatios

Potencia (kVA)	A	B	C	D	Masa (kg)	Volumen (L)
5	870	545	479	502	80	20
15	900	575	521	548	120	24
37,5	993	668	596	628	210	43

Ya con las dimensiones definidas para cada transformador, es posible calcular tanto el área como el volumen rectangular, para así determinar la cantidad máxima de transformadores por tarima con el área ya conocida de esta. En el Cuadro 5.5 se muestran los datos mencionados anteriormente para cada tipo de transformador, de manera que se tenga una idea preliminar del embalaje para cada tamaño.

Cuadro 5.6. Cantidad de transformadores por tarimas y cantidad total de tarimas necesarias

Potencia (kVA)	Volumen	Área	Transformadores por tarima	Cantidad de tarimas
5	0,209	0,240	5	2
10	0,232	0,263	4	9
15	0,257	0,286	4	15
25	0,309	0,330	3	35
37,5	0,372	0,374	3	2
50	0,444	0,429	2	35
75	0,648	0,626	1	32
100	0,843	0,743	1	13
167	0,945	0,708	1	6

La cantidad de tarimas expuesta en el Cuadro 5.5 no puede tomarse como distribución final, ya que los transformadores se encuentran distribuidos en los dos planteles o dentro de la red eléctrica de La Compañía, por lo que algunos tipos deberían mezclarse de manera que se realicen la menor cantidad de viajes posibles. Se supondrá que los transformadores en red se transportarán de último y desde una misma locación, por lo que para efectos de cálculo contará como otra zona de almacenamiento. Primeramente se agruparán los transformadores que se encuentran en mayor número en tarimas a razón de la cantidad máxima posible mostrada en el Cuadro 5.5, y luego se distribuirá el resto con el objetivo de minimizar el uso de tarimas y la cantidad de viajes.

El cálculo preliminar indica que en conjunto, se tiene 141 tarimas totalmente ocupadas, quedando libres ciertos transformadores como se muestran en el Cuadro 5.6. Se muestra además el acomodo que se le dio y la cantidad de tarimas equivalentes para cada sitio de almacenamiento, de manera que se pueda estimar la cantidad mínima de viajes posible.

Cuadro 5.7. Cantidad de transformadores libres y su distribución en las tarimas de transporte

Potencia (kVA)	Plantel San Rafael	Tarima N°	Plantel Desamparados	Tarima N°	Transformadores en red eléctrica	Tarima N°
10	1	1	2	1	0	-
15	2	1	3	2	2	1
25	2	2	1	1	2	2
50	1	2	0	-	0	-

No existe una cantidad óptima de transformadores en tarima que ofrezca beneficios de embalado o transporte sobre otras, por lo que será lo mismo colocar dos o tres transformadores en tarimas a una fracción de capacidad. La distribución de los contenedores se realizó tratando de asemejar el área ocupada en cada tarima, y con esto una mayor uniformidad a la hora del transporte, carga y descarga de los transformadores.

Con la información anterior se completa el cálculo de la cantidad de tarimas a transportar, por lo que se puede definir la cantidad mínima de viajes necesarios para cada caso en estudio. A continuación se presentan en el Cuadro 5.7 la distribución de tarimas (igual para ambos casos) y la distribución de viajes entre cada zona de almacenamiento, a razón de cuantos automotores se utilicen (Caso #1 un automotor y Caso #2 utilizar ambos vehículos).

Cuadro 5.8. Cálculo de la cantidad de viajes necesarios para ambos casos en estudio

Sitio de almacenamiento	Tarimas con transformadores	Tarimas con barriles	Tarimas totales	Cantidad de viajes Caso #1	Cantidad de viajes Caso #2
San Rafael	56	-	56	4	3
Desamparados	64	7	71	6	4
Red eléctrica	27	-	27	2	2
Hatillo	-	33	33	3	2
Guadalupe	-	5	5	1	1
Total	147	45	192	16	12

Cabe destacar que en varios de los viajes del caso dos, se necesitaría solo uno de los camiones, lo que implica una ventaja más pronunciada sobre el otro caso que se analiza. Se recomienda para este proceso la utilización de ambos camiones para minimizar los costos de transporte, o bien realizar un horario riguroso de movilización en cada plantel para aprovechar al máximo el montacargas antes de regresarlo a la empresa.

5.5.3. Contenedores con dispersión de sodio

De igual forma a como se embalaron los barriles de aceite contaminado, así puede realizarse con los cilindros de dispersión de sodio, ya que son exportados en unidades de tamaño estándar como las utilizadas en el aceite. Se colocarán dos por tarima y seguirán los reglamentos y recomendaciones definidas para el otro caso según el Reglamento concerniente, como la utilización de un solo nivel, el embalaje plástico y las etiquetas e información necesarias para su movilización.

5.5.4. Embalaje

Según Barquero (2014) para la sujeción de los transformadores y demás contenedores de sustancias peligrosas, se utilizarán flejes plásticos que se colocarán alrededor del conjunto de unidades posibles en cada tarima. Estos flejes mantendrán juntos los contenedores pero además sujetarán firmemente el plástico que se utilizará para envolver por completo el material a transportar.

Se podrían recomendar implementos más seguros como fajas de sujeción y bases metálicas atornilladas en las tarimas, sin embargo debido al peso elevado de los contenedores como un

conjunto y la distribución eficiente de las tarimas en el automotor, las medidas implementadas serían suficientes para no permitir el vuelco o separación de un contenedor durante su transporte.

Otros factores importantes a considerar son la distancia relativamente corta de los viajes a realizar y la cantidad de contenedores a transportar, por lo que el método actual brindaría los costos menos elevados de las acciones de embalaje analizadas. Algunas variables que disminuyen los costos son el ahorro de tiempo de embalaje y la utilización de implementos plásticos para sujetar los contenedores formando un solo bulto.

Aparte de lo mencionado anteriormente, es recomendable colocar bandejas de retención o algún otro dispositivo de retención líquida debajo de las tarimas, de manera que se pueda evitar un derrame al entorno. Lo anterior es necesario ya que aunque los contenedores se encuentren debidamente embalados y sujetos, las vibraciones y movimientos del automotor podrían generar una fuga apreciable, en especial debido a las condiciones físicas de algunos contenedores por su largo tiempo de almacenamiento.

5.6. Definición de las rutas permitidas

Determinada la cantidad de viajes necesarios para las sustancias peligrosas a transportar, lo último por definir es la ruta permitida para realizar este procedimiento. Como se define en el Reglamento 24715 para el transporte de Productos Peligrosos (2010) la Dirección General de Ingeniería de Tránsito del Ministerio de Obras Públicas y Transportes es la encargada de seleccionar las vías de tránsito adecuadas para este tipo de actividades.

Cabe destacar que los transformadores de la red eléctrica se piensan reemplazar y almacenar en la Bodega de San Rafael, tan pronto y se pueda desocupar ésta conforme se realizar los traslados a la empresa que los vaya a tratar. Por lo anterior quedan definidos los cuatros lugares de almacenamiento y la zona objetivo donde se transportarán todos los contenedores para ser procesados.

Con la información suministrada por la Dirección General de Ingeniería de Tránsito (2011) se trazará la ruta más corta desde cada plantel de La Compañía hasta la empresa que realizará el proceso, a razón de los caminos permitidos y las zonas que no se encuentren densamente pobladas. Además se establece que el transporte de materiales peligrosos se prohibirá durante las horas pico, establecidas en los horarios de 6:00 a 8:30 a.m. y desde las 16:30 hasta las 19:00 p.m. para el Gran Área Metropolitana.

5.6.1. Ruta de plantel San Rafael a empresa encargada del proceso

El plantel de La Compañía en San Rafael se encuentra junto a la ruta 167, la cual no está definida como vía de paso de productos peligrosos en el documento emitido para la empresa. Sin embargo la ruta 167 si se encuentra contemplada por la Dirección General de Ingeniería de Tránsito como ruta terciaria de transporte de materiales peligrosos (junto con la intersección con las rutas 104 y 27) por lo que no existe problema con utilizarla. Es importante determinar esto ya que aunque solo se utilizarán menos de 200 metros de esta carretera, es la única por la cual se puede salir del plantel de La Compañía.

El camino más corto consta de 27,9 kilómetros y comienza entrando directamente a la carretera de Circunvalación directamente desde la ruta 167, para así evitar pasar por zonas de mucha afluencia de tránsito (rutas 177 y 167). La carretera 39 se conecta con la ruta 215 (Curridabat-Plaza González Víquez) mediante la rotonda de las Garantías Sociales y finalmente se atraviesa la ruta 210 (Lomas de Ayarco-Damas de Desamparados) para llegar a la Autopista Florencio del Castillo (ruta 2). Esta última se sigue a través de La Lima de Cartago hasta el parque Industrial donde se encuentra la empresa.

5.6.2. Ruta de sub-plantel Desamparados a empresa encargada del proceso

Esta zona de almacenamiento se encuentra en el distrito de Gravilias, dentro de una zona residencial que colinda con casas de habitación pero cuenta con acceso a varias vías públicas con suficiente espacio para el paso de vehículos como los que se utilizarán. Alrededor del sub-plantel existen zonas sensibles como escuelas y un centro de recreación al aire libre, por lo que aunado a la presencia de casas de habitación a menos de 10 metros de la zona de almacenamiento, implica que se deben utilizar horarios donde se salvaguarde la integridad de las personas.

La trayectoria recomendada es de 25,8 kilómetros de longitud y comienza con la movilización a través de una calle secundaria de la ruta 210 (Lomas de Ayarco-Damas de Desamparados) hasta llegar a la susodicha carretera. Luego de lo anterior se sigue esta vía hacia el este de manera que se pueda conectar con la Autopista Florencio del Castillo (ruta 2). Después de esto se llega hasta la empresa de la misma forma que la ruta anterior.

5.6.3. Ruta de sub-plantel Hatillo a empresa encargada del proceso

Este plantel de La Compañía tiene la principal problemática de estar en una zona densamente transitada por automotores en horarios ya definidos y denominados pico, por lo que debe tenerse una especial consideración en términos de que vías utilizar. Se recomienda el uso de horarios tal que se encuentre la menor cantidad de personas y vehículos posible, ya que es una zona densamente poblada y un accidente podría afectar una gran cantidad de personas. Esta recomendación se extiende para el proceso de trasvasado a los contenedores ya que con los transformadores de potencia se maneja una alta cantidad de volumen de aceite contaminado

La manera más sencilla consta de 23 kilómetros y es la utilización de la Avenida San Martín para llegar rápidamente a la ruta 204 (Avenida 10-entre Calles 14 y 21), para luego conectarse junto al Parque de Nicaragua con la ruta 215 (Curridabat-Plaza Víquez). Después de lo anterior se sigue esta carretera hacia el este hasta encontrarse con la Autopista Florencio del Castillo (ruta 2) y se continúa en esta hasta llegar al parque industrial donde se tratará el aceite contaminado.

5.6.4. Ruta de sub-plantel Guadalupe a empresa encargada del proceso

Este lugar de almacenamiento también se encuentra en una zona densamente transitada por lo que debe regularse el horario y las condiciones de transporte a razón de esto, sin embargo no existe un gran problema con esto ya que solo se requiere realizar un viaje desde este sub-plantel. Este sitio se encuentra frente a una ruta primaria de transporte por lo que no se debe analizar rutas distintas o calles y avenidas secundarias.

Se comienza con la movilización hacia el suroeste por la ruta 109 (San Gerardo-Santo Tomás) hasta el inicio de la carretera de Circunvalación (ruta 39). Desde aquí se puede tomar la autopista Florencio del castillo (ruta 2) ya sea desde la rotonda en la fuente de la Hispanidad o más adelante mediante la ruta 215 (Curridabat-Plaza González-Viquez) y luego la 210 (Lomas de Ayarco-Damas de Desamparados) para llegar a la Autopista Florencio del Castillo (ruta 2).

Se recomienda la segunda opción ya que es la que ofrece la menor densidad de automotores y de personas con un recorrido similar, por lo que presenta la disposición más segura del transporte de sustancias peligrosas. Luego de entrar a la ruta 2 se continúa en esta de igual manera a como se hizo con las demás zonas de almacenamiento. El recorrido total sería entonces de 22,6 kilómetros si se utiliza la opción recomendada.

CAPÍTULO VI: ANÁLISIS DEL PROCESO DE DECLORINACIÓN Y REGENERACIÓN DEL ACEITE DIELECTRICO

6.1. Proceso de declorinación del aceite

El objetivo de este procedimiento es el análisis estructural, químico y cuantificado de los reactivos y productos que participan en la reacción de declorinación. Con la información recolectada se espera tener un mejor entendimiento del proceso que se lleva a cabo, además de tener una base para los otros análisis que se realizarán.

6.1.1. Reactivos

Cada reactor tiene dos entradas de reactivos, una donde ingresa el aceite contaminado con bifenilos policlorados luego de habersele eliminado la humedad en el desgasificador, y la otra donde ingresa el reactivo de sodio inmerso en el aceite desde el tanque de medición donde se calcula el flujo de total de sodio necesario.

6.1.1.1. Aceite contaminado

Según su hoja de seguridad confeccionada por Sigma-Aldrich (2002), el aceite utilizado por La Compañía está conformado por mezcla de naftas hidrotratadas medias y ligeras, de manera que son mezclas de hidrocarburos complejas con un rango generalizado de número de carbonos. Román (2013) muestra que los destilados livianos (comúnmente llamados naftas o destilados nafténicos) tienen un rango específico de 3 a 12 carbonos compuesto generalmente por 4%-8% alcanos, 25%-40% iso alcanos, 3%-7% ciclo alcanos, 20%-50% aromáticos y 2%-5% alquenos. Los destilados medios en cambio tienen un rango de 6 a 26 carbonos (denominado keroseno) y de 8 a 28 carbonos (denominado Diesel), constituidos por altas concentraciones de alcanos, alquil-ciclohexano e hidrocarburos aromáticos policíclicos (como los bifenilos).

Como definen Gary y Handwerk (2001) el hidrotratamiento es un proceso para estabilizar productos de la destilación del petróleo y elementos considerados problemáticos para procesos subsecuentes. Se basa en una reacción catalítica que hace a los compuestos insaturados (generalmente alquenos y aromáticos) reaccionar con hidrógeno para estabilizarlos y generar hidrocarburos parafínicos, mientras que a su vez elimina los elementos como nitrógeno, azufre, oxígeno, halógenos y trazas de metales. Es importante denotar que el proceso no rompe enlaces sencillos de los hidrocarburos, por lo que las cadenas de hidrocarburos presentes en los destilados medios y ligeros se mantendrán con la misma cantidad de carbonos que al inicio del hidrotratamiento.

Debido a lo expuesto anteriormente, se puede concluir que el aceite dieléctrico utilizado por La Compañía es de carácter parafínico, debido a que el hidrotratamiento convertiría cualquier compuesto aromático o insaturado al alcano correspondiente. Debido a la eficiencia del proceso es posible que exista una concentración apreciable de estas sustancias pero en general se constituye de alcanos poco ramificados con un rango de 5 a 28 carbonos.

6.1.1.1.1. Análisis de composición química del aceite dieléctrico

Para determinar el caso específico del aceite importado por La Compañía, y con esto tener una mejor idea de los posibles productos que se podrían sintetizar, se realizó un análisis de cromatografía de gases acoplado a un espectrómetro de masas en el Centro de Investigación en Productos Naturales (CIPRONA). Con esto se esperaba determinar los compuestos en mayor proporción y un estimado de la concentración porcentual de cada uno en la mezcla final.

Se tomó la decisión de utilizar una muestra de aceite nuevo, debido a que por la naturaleza del equipo a utilizar y el método de inyección, era arriesgado utilizar un aceite con algún contaminante sólido. Otro problema de utilizar un aceite contaminado con bifenilos policlorados es que conlleva una serie de cuidados adicionales de seguridad, que complican el análisis del aceite.

El contacto con la Institución se realizó mediante el PhD. Guy Lamoureux y la realización de los análisis estuvo a cargo de la Licda. Lorena Hernández. Se realizó una corrida con el aceite en su composición original y una segunda con el aceite luego de un tratamiento de metilación, de manera que se determinara la existencia o no de ácidos grasos dentro de la muestra.

El equipo utilizado es un sistema combinado de cromatografía de gases con espectrometría de masas (GC-MS), cuyo resultado es un sistema de segregación y análisis cuantitativo de una mezcla compuesta de sustancias conocidas y desconocidas en proporciones variables. Como menciona Niessen (2001) la cromatografía de gases es un método de separación en los cuales los componentes de una mezcla son distribuidos selectivamente en la fase móvil (un gas inerte, generalmente nitrógeno o helio) debido a su interacción con la fase estacionaria (columna empacada o la pared interna de un capilar) y procesos de adsorción/desorción particular para cada compuesto que pasa a través del sistema.

La espectrometría de masas es sin embargo la producción de iones en fase gaseosa a través de un bombardeo energético de manera que se puedan categorizar de acuerdo a su relación entre masa y carga energética (m/z). La segmentación es bastante selectiva por lo que es un buen método de análisis analítico-cuantitativo, además de que genera un espectro de masas que determina la proporción másica de cada componente elemental en una molécula, definiéndola en su totalidad.

En la Figura 6.1 se muestra el espectro de masas para el pentano (masa molecular 72 g/mol) donde se muestra el patrón específico para este tipo de compuesto hidrocarbonado (Yurkanis, 2004). A razón de los elementos involucrados y su abundancia relativa en la molécula total, se generan distintos patrones que representan estructuras moleculares específicas y están íntimamente ligadas con la masa molecular del fragmento molecular.

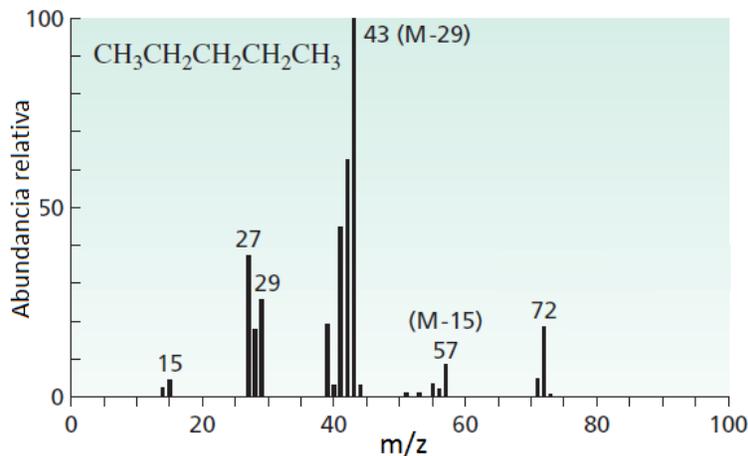


Figura 6.1. Espectro de masas para el pentano (Yurkanis, 2004)

El aceite dieléctrico ingresa entonces en el cromatógrafo, donde se separa en sus componentes individuales (mayoritariamente hidrocarburos) y luego cada uno de estos es analizado en el espectrómetro de masas generando un espectro como el mostrado anteriormente. A manera de respuesta el equipo entrega un diagrama GC-MS como el que se encuentra en el trabajo de Hübschmann (2009) y se muestra en la Figura 6.2 para un aceite mineral. Cada pico representa un compuesto con una cantidad de carbonos específica y que generalmente aumenta con el tiempo de retención, ya que a mayor masa molecular existe un aumento en el punto de ebullición de un compuesto en condiciones similares de estructuración química.

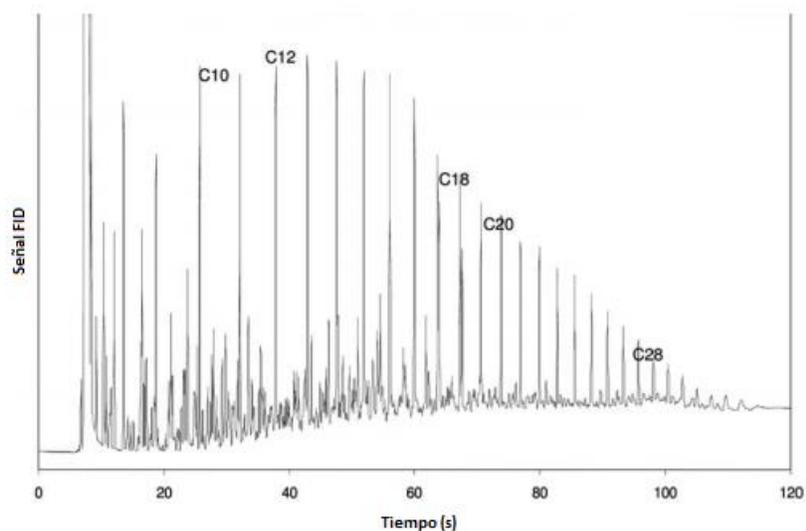


Figura 6.2. Cromatograma GC-MS para un aceite mineral (Hübschmann, 2009)

Luego del análisis para la muestra de aceite en estudio, se obtuvo el Cromatograma GC-MS mostrado en la Figura 6.3. Como puede identificarse en comparación con el diagrama anterior, se

generó una curva o franja de interferencia dentro del espectro, de manera que no es posible identificar los picos de una manera precisa.

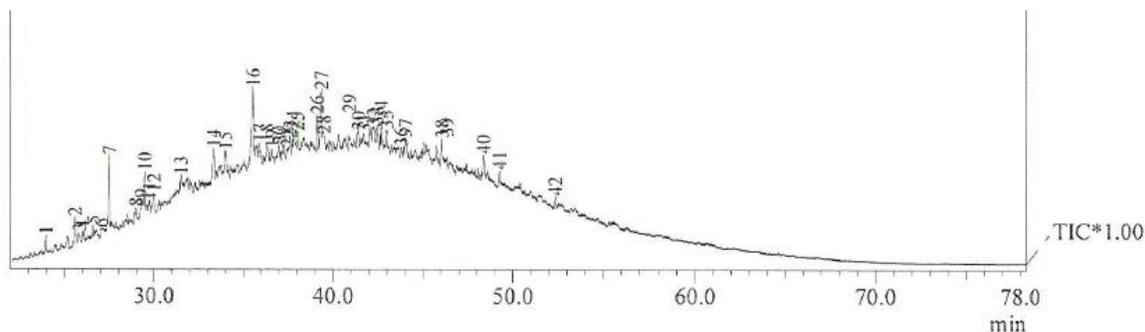


Figura 6.3. Cromatograma del aceite obtenido en el sistema GC-MS del CIPRONA

Bors y Meghea (2006) investigaron sobre el método conjunto de GC-MS para el análisis de PCB's en aceite dieléctrico de transformador, y generaron un Cromatograma para el aceite sin una concentración apreciable de estos tal y como se muestra en la Figura 6.4. El espectro es bastante similar al mostrado en la Figura 6.3, y exponen que debido al aspecto parafínico del aceite dieléctrico comúnmente utilizado, este método no permite una separación adecuada de los componentes hidrocarbonados y genera un incremento Gaussiano como el mencionado anteriormente.

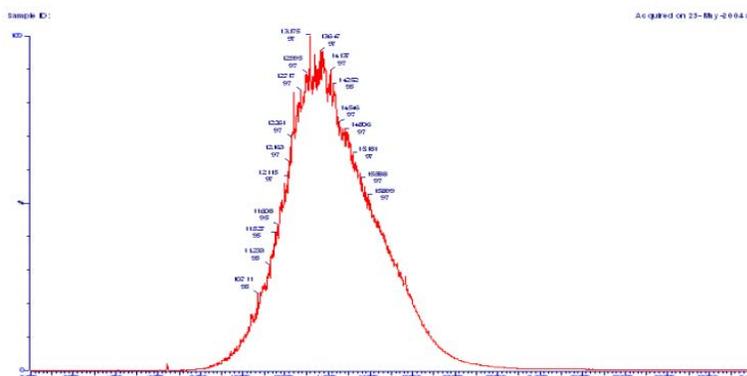


Figura 6.4. Cromatograma de aceite dieléctrico libre de PCB's (Bors & Meghea, 2006)

Se utilizó un método recomendado por la Licda. Lorena Hernández que consistía en la “sustracción” de área referente al incremento Gaussiano o interferencia al área de cada pico representativo y con esto obtener un estimado del compuesto en particular. Se obtuvieron porcentajes altos de fiabilidad (mayores la 85%) en la mayoría de los picos estudiados, por lo que se pudieron obtener varios compuestos y su proporción respecto a la mezcla con un alto grado de certeza tal y como que se muestra en el Cuadro 6.1. Cabe destacar que los puntos de ebullición de cada sustancia pura se calcularon con el programa de software ChemDraw (2008), y deben ser tomados como guía y no como regla estricta, ya que las propiedades de la mezcla pueden variar esta propiedad de manera importante.

El problema con el método utilizado es que el resultado del análisis depende el punto específico en que se realiza la sustracción (debido a la irregularidad del espectro, no siempre existe un punto único de referencia) por lo que inclusive puede cambiar el compuesto identificado. Como criterios complementarios se utilizaron las reglas de punto de ebullición a razón de las propiedades moleculares de las sustancias, como masa molecular, ramificaciones, grupos funcionales y longitud de cadena hidrocarbonada para eliminar cualquier compuesto que no cumpla con las especificaciones del método (el cromatógrafo separa los compuestos por evaporación de estos, por lo que los picos analizados deben ir en orden creciente de punto de ebullición a medida que se avanza de izquierda a derecha en el Cromatograma).

Cuadro 6.1. Análisis de componentes de la muestra de aceite para el sistema GC-MS

Pico	Tiempo de retención (minutos)	Porcentaje de área	Temperatura de ebullición (°C)	Nombre
1	23,982	1,21	283	Octahidro-2,2,4,4,7,7-hexametil-, trans-1H-Indeno
2	25,588	2,06	405	2-n-butil-8-n-hexildecahidronaftaleno
7	27,506	4,09	380	2,6-bis(1,1-dimetiletil)-4-metil-fenol
10	29,486	3,15	450	18 Nonadecen-1-ol
13	31,506	1	338	2-hexil-1-octanol
14	33,346	3,75	337	2,6,10-trimetil-Pentadecano
15	34,006	1,9	396	Docoseno
16	35,540	11,83	384	Eicosano
26	39,139	2,24	522	Hexacosano
27	39,359	6,78	610	2,6,10,15,19,23-hexametil-tetracosano
35	42,995	2,7	658	Dotriacontano
40	48,366	2,6	-	Tetracontano

Con la información anterior, se tomó la decisión de descartar los compuestos determinados en los picos 13 y 14, debido a que presentan una disminución del punto de ebullición y masa molecular muy importante respecto a las sustancias anteriores. Una situación similar se presenta con el compuesto relacionado con el pico 7, pero este se conservó debido a que es un aditivo muy comúnmente utilizado como antioxidante en aceites lubricantes (Rudnick, 2009). Las sustancias docoseno y eicoseno se mantendrán en el análisis debido a que su masa molecular es muy similar o mayor a la del 18 nonadecen-1-ol, además de que sus puntos de ebullición también son similares al de este compuesto. Otro factor que permite esto anterior es el aumento desproporcionado del punto de ebullición entre el pico 7 y el 10, lo que indica que el compuesto a discriminar es el alcohol sobre los compuestos hidrocarbonados, a sabiendas de la naturaleza del aceite mineral.

Adicionalmente al análisis anterior, se realizó una prueba de metilación química a otra muestra del aceite de la Compañía (proveniente del mismo recipiente de almacenamiento) de manera que se pudiera determinar la presencia de ácidos grasos junto a los aceites ya especificados. Se utilizó un método sencillo de metilación/extracción con metanol y metil tert-butil éter respectivamente, para luego realizar un lavado básico con una solución de hidróxido de sodio. Se analizó el resultado de este procedimiento con el equipo de GC-MS para obtener el Cromatograma respectivo, el cual

diferiría del original si existían ácidos grasos en el aceite (transformados a su éster metílico correspondiente). Al analizar el espectro y los picos individuales, se obtuvieron en general los mismos compuestos que en la corrida anterior, por lo que se puede concluir que al aceite no se le agregan ácidos grasos en el momento de su formulación.

Luego de los análisis realizados, a razón de los criterios definidos con anterioridad y la información ya conocida de la muestra utilizada, se obtuvo la siguiente información del aceite dieléctrico respecto a su composición química (tomando en consideración las deficiencias del método GC-MS para esta sustancia):

- Como se nota en la Figura 6.3 y en los porcentajes de fiabilidad a la hora de identificar los compuestos, luego del pico 29 la precisión del método disminuye de manera apreciable y esto conlleva a que las conclusiones tomadas después de este punto no puedan ser tomadas en cuenta. Lo anterior se muestra en la diferencia dimensional entre los picos identificados y la curva de interferencia, puesto que es pequeña y esto disminuye la exactitud de los resultados para esa zona del Cromatograma.
- Se comprobó que el aceite es una mezcla de hidrocarburos principalmente de cadena larga y poco ramificada, pero que también cuenta con compuestos cíclicos e insaturaciones con mayor reactividad que los anteriores. La proporción específica y compuestos determinados se muestran en el Cuadro 6.2, según el procedimiento de análisis GC-MS.

Cuadro 6.2. Compuestos determinados por análisis GC-MS para la muestra de aceite

Compuesto	Caracterización	Proporción (%)
Octahidro-2,2,4,4,7,7-hexametil-, trans-1H-Indeno	Compuesto bicíclico, metilado y compuesto solamente de carbono e hidrógeno	1,21
2-n-butil-8-n-hexildecahidronaftaleno	Compuesto bicíclico, con dos ramificaciones y compuesto solamente de carbono e hidrógeno	2,06
2,6-bis(1,1-dimetiletil)-4-metil-fenol	Fenol tri-sustituído, con un grupo activo –OH, utilizado como antioxidante	4,09
18 Nonadecen-1-ol	Hidrocarburo insaturado y con un grupo –OH, no ramificado y de cadena larga	3,15
Docoseno		1,9
Eicosano	Hidrocarburo no ramificado de cadena larga, sin grupos activos.	11,83
Hexacosano	Hidrocarburo no ramificado de cadena larga, sin grupos activos.	2,24
2,6,10,15,19,23-hexametil-tetracosano	Hidrocarburo hexametilado de cadena larga, sin grupos activos.	6,78

- Se determinó la existencia de compuestos con grupos activos de tipo –OH, los cuales pueden oxidarse a ácidos carboxílicos y participar en reacciones de esterificación como se mencionará en el apartado de productos de reacción del presente análisis.

- Según Hernández (2014) la principal causa de los resultados obtenidos y la generación de la curva gaussiana es el tipo de columna utilizada en el sistema GC-MS. Se debería investigar que material y tipo de columna sería el adecuado para el análisis de un aceite parafínico, sin embargo en el CIPRONA Se cuenta solamente con la columna utilizada.
- Se comprobó mediante el análisis que el aceite es una mezcla de compuestos saturados generalmente lineales, con un rango variado que no supera los 28 carbonos (la cadena más larga es la del hexacosano con una cadena de 26 carbonos) y muy poca cantidad de dobles enlaces. La presencia de grupos –OH puede provenir de impurezas, aditivos o señales preliminares de oxidación ya sea del aceite o del contenedor.

6.1.1.2. Reactivo de sodio metálico

Se utilizará el reactivo de sodio metálico en dispersión de aceite mineral, el cual reacciona con agua formando gases inflamables (hidrógeno) que podrían incendiarse espontáneamente. Se caracteriza por ser un agente desprotonante, de manera que puede formar un par iónico junto con la molécula reactante (sustituyendo el halógeno) más fuerte que el metal original, que puede a su vez sustituir otra molécula de halógeno (reacción de alquilación). Es insoluble en la mayoría de solventes como los hidrocarbonados, por lo que su presentación habitual es en dispersión en aceite mineral de la solución microcristalina en rangos de partícula de 5-50 micrómetros.

Según Vijgen y McDowall (2008) el proceso de declorinación de bifenilos policlorados con sodio metálico ha sido el método establecido por la Convención de Basilea desde 1985, propuesto en ese entonces por Kinetrics Inc, una empresa con más 100 años de experiencia en la industria de la electricidad. En este anexo del Convenio de Basilea se tiene que desde 1985 se han tratado miles de toneladas de aceite contaminado, siendo un método adoptado por empresas como Sanexen Environmental Services Inc, Powertech Labs Inc y Toyota City Plant como las empresas de mayor renombre a nivel mundial.

En el trabajo de Ferrie, Braun, y John (1982) se muestra que la relación molar de sodio a halógeno reducible tiene un rango de 4:1 a 8:1 para una dispersión de sodio de partícula fina, donde al menos un 80% tiene un diámetro por debajo de los diez micrómetros. Es importante que las partículas de sodio sean pequeñas, de manera que se tenga una mayor eficiencia de reacción. Debe llevarse un control exhaustivo de la relación sodio/halógeno para disminuir la cantidad de subproductos de reacción y el riesgo asociado al lavado con agua que se debe realizar al final de la declorinación.

6.1.2. Productos

La caracterización de los residuos se tomó de un análisis realizado por Hodgson (2010) debido a que proviene de la empresa que diseñó los equipos y ha constatado de su eficacia en distintos países del orbe, por lo que cumple a cabalidad con la experiencia mínima solicitada por la Compañía. Se tiene poca información acerca del origen y las propiedades del aceite utilizado en el análisis que generó la caracterización analizada, por lo que la proporción de los residuos puede ser distinta para el proceso a realizar en el país. Con el estudio del fluido dieléctrico de La Compañía se determinó que sin importar las proporciones en la mezcla de hidrocarburos, se generarán los mismos productos (principalmente porque están fuertemente ligados a la oxidación y tratamiento con sodio en vez de la naturaleza química del aceite) aunque en proporciones distintas.

6.1.2.1. Cloruro de sodio

Esta sustancia es el producto principal de la reacción de declorinación, sin importar el mecanismo en la cual se lleve a cabo. Se forma debido a la reacción del ion sodio con el cloruro enlazado a la molécula de bifenilo, formando la sal y un compuesto más estable. Independientemente de la temperatura de reacción, el cloruro de sodio permanece sólido pero disuelto en la fase acuosa de la mezcla producida en los reactores. Con el uso de la centrifuga es sencillo separarlo del aceite descontaminado por su diferencia de densidad y afinidad en cuanto a solubilidad.

6.1.2.2. Residuos no saponificables

Es una categoría muy amplia por lo que es complicado determinar la naturaleza de las sustancias involucradas, pero debido a que conforman el 10% de la totalidad de los residuos es importante identificarlas lo mejor posible. Como se denominan no saponificables, se deben analizar las propiedades de este tipo de reacción y cuáles de los residuos ya confirmados no las cumplen ni pueden categorizarse en alguno de los otros grupos de la categorización.

Moreda, Pérez, y Cert (2004) definieron la materia no saponificable como una mezcla de residuos denominados no volátiles, correspondientes a distintas familias químicas. Es un residuo generado por la saponificación de los ésteres de ácidos grasos, reacción secundaria que sucede junto a la declorinación como se expondrá más adelante.

La composición exacta de la materia no saponificable depende del hidrocarburo que sufre la saponificación, por lo que es complicado definir una estructura específica. Debido a la concentración de ésteres de ácidos grasos y sales de sodio, se espera que este tipo de materia no tenga un porcentaje importante en el 10% de los residuos saponificables totales, por lo que su importancia en los análisis posteriores será baja.

Dentro de esta categoría se encuentran además los contaminantes externos como el polvo y partículas metálicas provenientes del núcleo, además de los denominados “lodos” conformados por los productos de oxidación (exceptuando los ésteres), residuos celulósicos provenientes del papel y residuos generados por el agotamiento de los aditivos. Algunas sustancias mencionadas anteriormente como el carbono elemental que se producen debido a la formación de los otros productos, se incluyen en esta categoría siempre y cuando no formen un alcohol al contacto con una base como el hidróxido de sodio.

6.1.2.3. Hidróxido de sodio

La formación de hidróxido de sodio a partir de sodio metálico se realiza por la presencia de agua en el sistema de reacción, según la ecuación química presentada a continuación:



Como se puede observar, un producto importante de considerar es el hidrógeno gaseoso. El anterior es un gas no condensable en las condiciones de operación y muy inflamable, por lo que debe ser capturado y almacenado de manera que no presente un riesgo importante de explosión en el proceso a realizar (Sigma Aldrich, 2014). El ingreso de agua a los tanques de reacción se realiza para

eliminar cualquier remanente de sodio residual, y con esto evitar que esta sustancia tan reactiva entre a la centrifuga y tenga contacto con el agua de lavado. Por lo anterior es muy importante medir la cantidad de sodio agregado al sistema y la concentración de PCB's en el aceite, de manera que se agregue la menor cantidad de agua posible y así disminuir la producción de hidrógeno.

6.1.2.4. Ésteres de ácidos grasos

Compuestos que cuentan con un enlace simple oxígeno-carbono, donde el último pertenece a una larga cadena hidrocarbonada que lo identifica a razón del ácido graso con la misma configuración de carbonos. Un ácido graso se define como un grupo carboxílico enlazado a una cadena de hidrocarburo como se muestra en la Figura 6.4. Para la estructura del ácido palmítico.

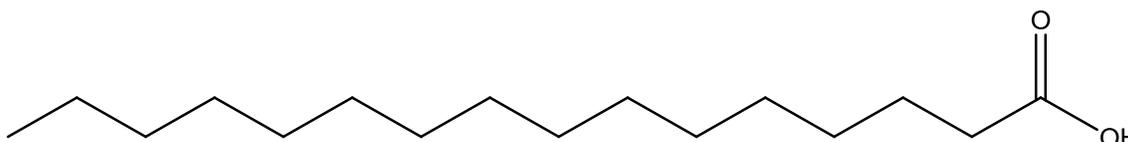


Figura 6.5. Estructura molecular del ácido palmítico (Realizado en ChemBioDraw 2008)

Un éster de ácido graso es por ende un ácido graso al que se le ha sustituido el hidrógeno enlazado al oxígeno del grupo alcohol por un carbono, ya sea enlazado solamente a hidrógenos o perteneciente a una cadena compuesta hidrocarbonada. Un ejemplo de esta molécula es el palmitato de etilo cuya estructura molecular se muestra en la Figura 6.5 a continuación:

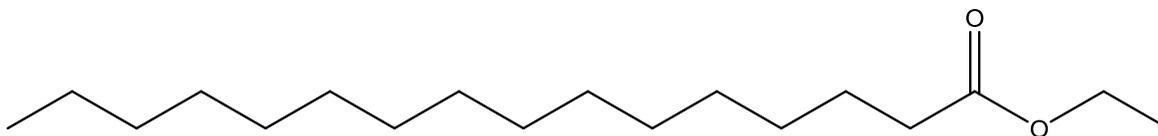


Figura 6.6. Estructura molecular de un éster de ácido graso (Realizado en ChemBioDraw 2008)

Al ser el aceite de tipo mineral, la posibilidad de encontrar ésteres de ácidos grasos es muy baja, debido a que provienen del petróleo. La posibilidad con mayor fundamento es la presentada por Georgiev, Karamancheva, y Topalova (2007) donde la oxidación y descomposición de los hidrocarburos debido a su uso continuo durante un largo tiempo puede producir alteraciones químicas en el aceite, y con esto residuos gaseosos (CO, CO₂ e hidrocarburos volátiles) líquidos (alcoholes, ácidos carboxílicos, cetonas, alquitranes y agua) y productos pesados como el asfalto. Si bien las concentraciones de estos materiales pueden ser muy bajas, el tiempo y la temperatura pueden ser determinantes a la hora de producirlos, además de que la concentración a la salida de estos residuos luego de la dechlorinación también es baja (menor al 3% en su totalidad).

Como menciona Bruce (2012) la reacción de oxidación de un hidrocarburo forma un radical alquilo debido a catálisis energética o por la presencia de metales específicos. Este es el paso inicial para el proceso oxidativo tal y como se muestra en las reacciones (5.2) y (5.3), y forma radicales muy inestables que reaccionarán fácilmente con oxígeno para formar radicales de peróxido de alquilo (ROO·).

Debido a que no existe una concentración elevada de este radical en las etapas tempranas de la oxidación, este reacciona con otros hidrocarburos para formar nuevos radicales de peróxido de alquilo (reacción de propagación) e hidroperóxidos (ROOH) como se muestra en las reacciones (5.4) y (5.5). Existen otras reacciones secundarias que muestran la autocatálisis de la oxidación, pero no son de mayor importancia para este análisis.



El sistema carboxílico producto de la reacción anterior genera los ésteres de ácidos grasos que se presentan en los productos de reacción, ya sea durante el tiempo en que el transformador se tuvo en uso o debido al calentamiento necesario para la reacción de dechlorinación. Como se mostró en el análisis GC-MS del aceite, éste se conforma principalmente por cadenas largas de hidrocarburos, por lo que la generación de este tipo de ésteres por oxidación del aceite es el proceso que se considera como el más probable.

Como se mencionó anteriormente, un subproducto de la reacción de oxidación son las cetonas, debido al método de reacción por radicales libres. Estas sustancias se categorizarán como residuos no saponificables, pero serán solo un pequeño porcentaje de estos, ya que deben tener una cantidad de masa similar a los ésteres de ácidos grasos.

6.1.2.5. Sodio saponificado

También denominado sales de sodio, son los compuestos formados luego de que los ésteres de ácidos grasos mencionados anteriormente sufren una reacción de hidrólisis alcalina con el sodio metálico como base. Para entender a fondo este procedimiento es importante definir el concepto de saponificación y las características más importantes de este tipo de reacción.

6.1.2.5.1. Saponificación

Uno de las reacciones más comunes que involucran a los ésteres de ácidos grasos es la saponificación o hidrólisis alcalina, en la que una base reacciona con el éster de ácido graso formando la sal correspondiente con el catión liberado, además de una molécula de glicerol (para el caso de grasas y ésteres compuestos) o un alcohol simple (para un éster regular). La reacción de saponificación del benzoato de metilo se muestra a continuación en la Figura 6.6, utilizando como base el hidróxido de sodio.

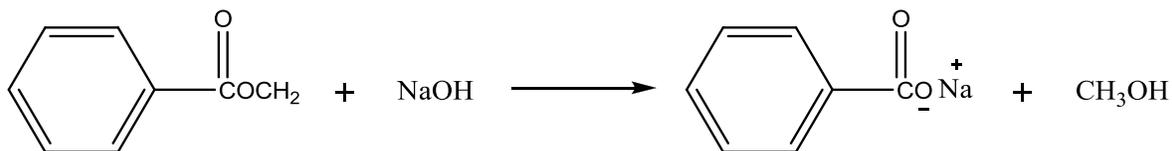


Figura 6.7. Reacción de saponificación del benzoato de metilo (Realizado en ChemBioDraw 2008)

Aunque estos compuestos son más estables que los ésteres de ácidos grasos debido a la estabilización por resonancia del ion carboxilato, ambos se encuentran dentro de los productos de la dechlorinación debido a que provienen de una reacción secundaria. La saponificación involucrada cuenta con una velocidad de reacción más lenta que la reacción principal debido a sus cinéticas asociadas, por lo que el tiempo de procesamiento no es suficiente para una conversión completa de los ésteres a sales de sodio saponificado (Fessenden & Fessenden, 1983). Otra razón asociada es que la reacción se lleva a cabo a una temperatura muy por encima de la ambiente, y después los productos se enfrían debido a que son separados del aceite descontaminado en una centrifuga. A pesar de que la reacción se puede considerar irreversible por la estabilidad de la sal formada, un enfriamiento puede provocar la formación de ésteres de ácido graso nuevamente.

6.1.2.6. Carbonato de sodio

El carbonato de sodio puede tener dos orígenes distintos, pero ambos caminos involucran el dióxido de carbono. Como se menciona en la producción de ésteres de ácidos grasos, durante el proceso normal de corrosión de los aceites de transformador se produce dióxido de carbono. Este se forma en proporciones bajas pero debido a la hermeticidad del sistema y el tiempo promedio de vida de un transformador, puede llegar a generar una cantidad importante de la sustancia.

La primera reacción se da entre el hidróxido de sodio y el dióxido de carbono, generando carbonato de sodio y agua como se muestra a continuación:



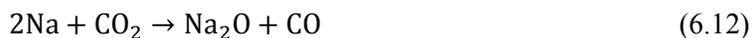
Esta reacción es muy común en sistemas de absorción de dióxido de carbono del aire atmosférico en torres de soda cáustica, donde se obtiene soluciones acuosas de carbonato de sodio e hidróxido de sodio (Mahmoudkhani & Keith, 2009).

La segunda reacción ocurre entre dióxido de carbono con sodio metálico, tomando en cuenta que hay una concentración importante de dióxido de carbono que no fue eliminado por el desgasificador o se formó luego de ese proceso. La ecuación estequiométrica se muestra a continuación, donde se puede ver que se puede formar oxalato de sodio en una reacción secundaria, mientras que en la principal se obtiene además monóxido de carbono (Simon, Latgé, & Gicquel, 2007).



Según los estudios realizados por Miyahara, Ishikawa, y Yoshizawa (2011) la reacción neta de producción de carbonato de sodio a partir de dióxido de carbono tiene como producción adicional a los de la reacción (5.7) al carbono elemental, y está en función de un conglomerado de reacciones, de las cuales se muestran a continuación tomando en cuenta los productos intermedios y reacciones secundarias.





Como se puede notar hay reacciones en las que se forma el óxido de sodio, sin embargo este producto no permanece al final de la reacción. Lo anterior se debe a que la formación de este ocurre generalmente a temperaturas mucho más altas que la temperatura de reacción (generalmente a temperaturas por encima de los 500 °C), además de que el contacto de esta sustancia con el agua produce hidróxido de sodio, presente en los residuos de reacción.

Otro residuo importante de analizar es el carbono elemental, ya que es mencionado en las dos investigaciones revisadas como posible producto neto de la reacción. El carbono elemental puede presentarse de tres maneras distintas: como grafito, carbono o diamante. Debido a las condiciones del proceso, es claro que la última es descartable, y como las otras dos posibilidades presentan una reactividad muy baja con los demás sustancias involucradas, de formarse esta sustancia se eliminaría en la centrífuga junto con los demás residuos sólidos generados. El carbono entra en la categoría de residuos no saponificables, de manera que está contemplado en los residuos del proceso de declorinación y no presenta un riesgo al estar presente en el sistema de reacción.

6.1.2.7. Asfaltos y alquitranes

Existen dos posibles razones por la cual se encontraron estas sustancias en la mezcla de productos de la declorinación, y son muy similares a las de los ésteres de ácidos grasos. Según Michalica, Kazatchkov, Stastna, y Zanzotto (2008) se muestra que los asfaltos son una mezcla compuesta de hidrocarburos, tal es así que no se tiene una composición química definida de estos. A grandes rasgos se tiene que se conforman de un 10% de hidrocarburos saturados, 43% de aromáticos nafténicos, 34% aromáticos polares y 13% de asfaltenos. Los asfaltos pueden contener pequeñas cantidades de nitrógeno, azufre y oxígeno dentro de su estructura molecular.

El alquitrán tiene una composición química similar a la del asfalto, además de variar de manera importante dependiendo del lugar de donde proviene. Como indica La Agencia Estadounidense para sustancias tóxicas y registro de enfermedades (2011) el alquitrán es una mezcla compleja de hidrocarburos aromáticos policíclicos, fenoles, y compuestos heterocíclicos conteniendo oxígeno, nitrógeno y azufre. Es seguro definir ambos como un solo compuesto homogéneo a la hora de definir sus propiedades toxicológicas y analizar su tratamiento y vertido final.

Debido a su baja concentración a la salida es posible pensar que estas sustancias se produjeron por la descomposición del aceite al calentarlo a la temperatura de reacción y mantenerlo así durante el tiempo de proceso o cuando se calentó en el desgasificador para evaporar el agua. La otra posibilidad es que estas sustancias se formaron durante el tiempo en que el transformador estuvo en

operación, y se transportó por todo el sistema de descontaminación hasta salir por los lodos de la centrífuga.

6.1.3. Reacción de declorinación

La declorinación es la reacción principal del proceso estudiado, y su objetivo principal es la captura de los átomos de cloro enlazados a los bifenilos con un reactivo de sodio metálico. Mediante este procedimiento se obtienen moléculas de menor peligrosidad como se muestra en la esquematización de la reacción en la Figura 6.7, para un bifenilo diclorado en presencia de sodio metálico.

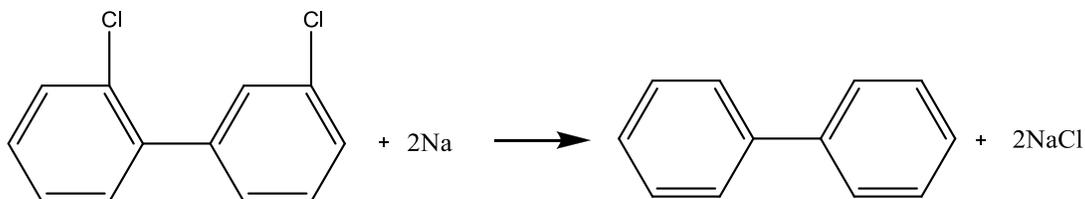


Figura 6.8. Reacción de declorinación de un bifenilo diclorado con sodio metálico (Realizado en ChemBioDraw 2008)

La reacción con sodio metálico tiene características distintas a las otras reacciones de declorinación, debido a que su mecanismo se rige por un equivalente a la reacción de Wurtz (Hidalgo, 2009). Lo anterior implica que pueden formarse subproductos e inclusive polimerización, debido a los posibles mecanismos que se pueden ver involucrados.

6.1.3.1. Posibles mecanismos de la reacción de Wurtz

Arora (2006) mencionó que la reacción de Wurtz se puede realizar mediante dos tipos de mecanismos químicos, vía compuestos organometálicos con un enlace sodio-carbón y vía radicales libres. Ambos mecanismos convergen en el mismo producto (o productos dependiendo del grado de cloración del bifenilo) por lo que no es importante definir cual se da mayoritariamente, sin embargo existe mayor evidencia para fundamentar el primer mecanismo mencionado.

6.1.3.1.1. Mecanismo vía organometálicos

Los compuestos organometálicos son aquellos que cuentan con un enlace carbono-metal, donde se utilizan para reacciones donde se requiere que un carbono o cadena reaccione con un electrófilo, de manera que se forma un enlace con un elemento menos electronegativo que este. El mecanismo de la reacción de Wurtz-Fittig (para compuestos aromáticos) por este mecanismo se muestra a continuación en la Figura 6.8 para clorobenceno, pero puede extrapolarse para bifenilos policlorados si se analiza cada halógeno por separado.

En el mecanismo anterior se muestra cómo reaccionaría un bifenilo monoclorado, por lo que no se logra percibir el efecto de polimerización. Para moléculas de bifenilo con varios puntos activos halogenados, es posible generar compuestos aromáticos de cadena larga, dependiendo del nivel de cloración y la cantidad de reactivo de sodio.

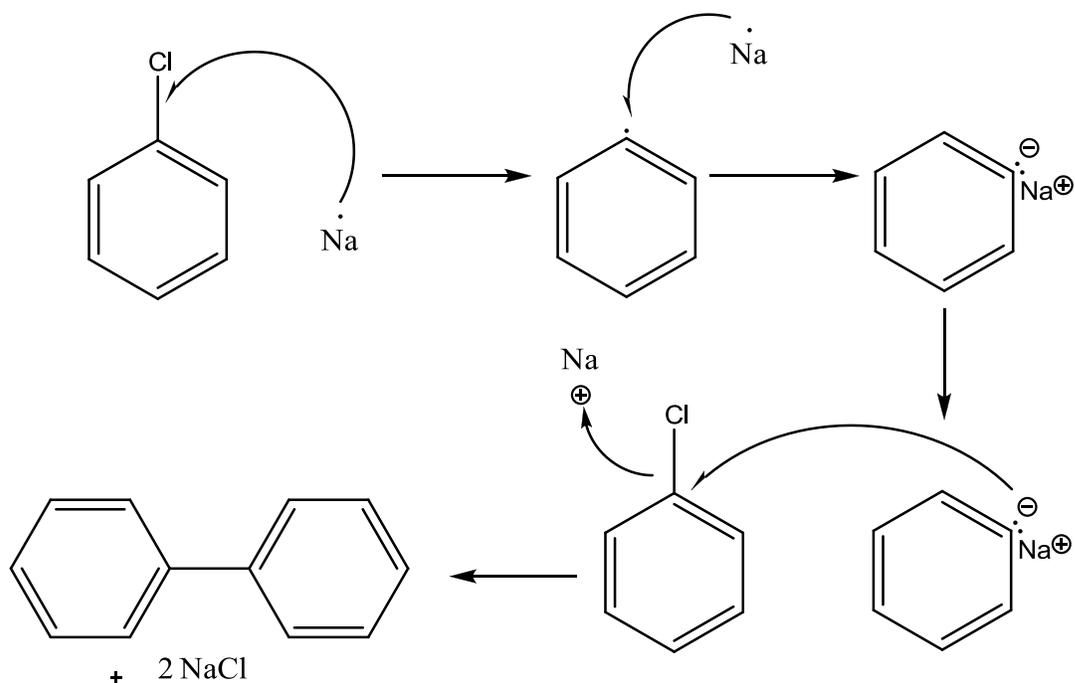


Figura 6.9. Mecanismo vía organometálicos para la reacción de declorinación (Realizado en ChemBioDraw 2008)

6.1.3.1.2. Mecanismo vía radicales libres

Este mecanismo también involucra la transferencia de un solo electrón por parte del sodio al carbono bencílico, sin embargo muestra la posibilidad de una reacción entre dos radicales idénticos, formando el bifenilo correspondiente. Este mecanismo de reacción se muestra con mayor detalle en la Figura 6.9. Para una molécula de bromobenceno.

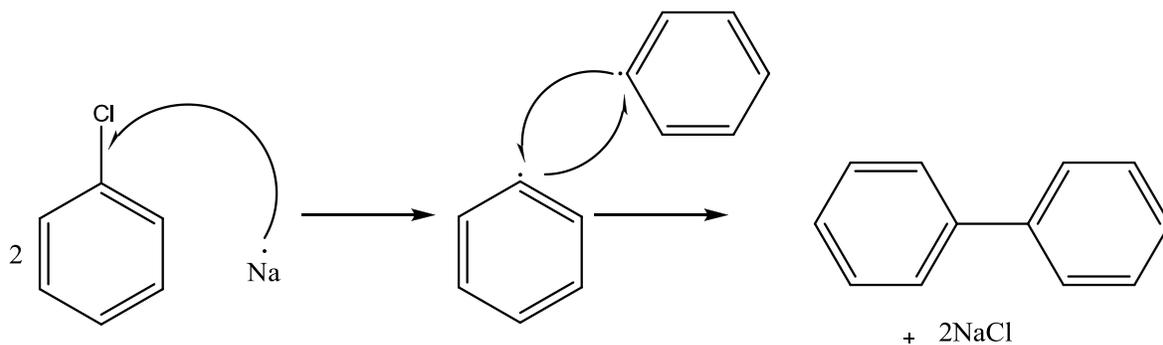


Figura 6.10. Mecanismo vía radicales libres para la reacción de declorinación (Realizado en ChemBioDraw 2008)

6.1.4. Balances de materia

Según el inventario realizado por La Compañía, el total de litros de aceite a tratar es de aproximadamente 55000 litros, y entre ambos reactores se producen tandas de 750 litros. Por lo consiguiente se realizará un análisis completo del proceso tomando como base 750 litros de aceite contaminado con bifenilos policlorados de un peso molecular promedio, por lo que se supondrá que solamente se encuentran presentes bifenilos pentaclorados. Tomando en cuenta que la gravedad específica del aceite es de 0.88 (Chevron Texaco Global Lubricants, 2002) se puede obtener la cantidad de masa total a tratar en el sistema según la ecuación (6.16), asumiendo que la presencia de PCB's no aumenta significativamente la densidad de la mezcla.

$$m_{ac} = \rho_{ac} * V_R \quad (6.16)$$

Con lo que se encuentra que se deben tratar 653 kilogramos de aceite contaminado. En el trabajo de Hodgson (2010) se muestra que para el tratamiento de 1500 litros de aceite contaminado con una concentración de PCB's promedio de 50 ppm, la cantidad total de residuos es de 7 kilogramos, dividido en las sustancias que se muestran en el Cuadro 6.3. En general dentro de esta mezcla de sustancias se encuentra mezclado con una cantidad importante de aceite, debido a que la centrífuga no logra separarlos por completo a causa de la dispersión del antes mencionado en el agua de lavado.

Utilizando nuevamente la ecuación 6,16 para determinar la masa de aceite presente en 1500 litros de aceite, se encuentra que es 1320 kilogramos. Con la relación másica de aceite tratado/residuos generados, se puede encontrar la masa de residuos generados para el caso del lote de 750 litros como se muestra a continuación:

$$653 \text{ kg Aceite} * \frac{7 \text{ kg residuos}}{1320 \text{ kg Aceite}} = 3,46 \text{ kg de residuos}$$

Con la masa total de residuos y la distribución porcentual para cada residuo se encuentra la cantidad de residuos que se generan para cada lote de proceso, información que se muestra en el Cuadro 6.3. Teniendo esta masa se puede determinar la importancia específica de cada residuo generado durante el proceso de declorinación del aceite.

Cuadro 6.3. Productos de la reacción de declorinación y su proporción másica

Productos de la declorinación	Porcentaje en masa (%)	Masa de residuos (g)
Aceite descontaminado	49.8	1724,42
Cloruro de sodio	30.9	1070
Residuos no saponificables	10.0	346,27
Hidróxido de sodio	5.4	187
Ésteres de ácidos grasos	0.8	27,7
Carbonato de sodio	0.8	27,7
Sodio saponificado	1.3	45,015
Asfaltos y alquitranes	0.1	3,46
Bifenilos policlorados (No detectables)	0.0	0

Tomando como suposición que los PCB's contenidos son primordialmente pentaclorados (de manera que se contemple un punto medio de cloración entre los posibles congéneres) se tiene que la masa molecular de estos es aproximadamente 326,43 g/mol. Realizando un promedio aritmético entre las concentraciones de PCB's en los transformadores con aceite contaminado, se tiene que la concentración media a utilizar es de 296 ppm. Con los datos anteriores se puede determinar la masa de bifenilos policlorados a tratar en cada tanda como se muestra a continuación:

$$m_{PCB} = 653 \text{ kg} * 296 \text{ ppm} * \frac{1 \text{ kg}}{1000000 \text{ mg}} = 0,1933 \text{ kg}$$

Con la masa de bifenilos policlorados y su peso molecular, se puede determinar los moles de bifenilos policlorados y con esto los moles de cloro que entran al sistema para determinar si el aceite que se va a tratar es similar al analizado por Hodgson (2010). Se realizará un balance de cloro debido a que es la sustancia de mayor importancia en el proceso en estudio.

$$mol_{Cl} = 0,1933 \text{ kg PCB} * \frac{1000 \text{ g PCB}}{1 \text{ kg PCB}} * \frac{1 \text{ mol PCB}}{326,43 \text{ g PCB}} * \frac{5 \text{ mol Cl}}{1 \text{ mol PCB}} = 2,96 \text{ mol de Cl}$$

Por ende para una masa molecular de cloruro de sodio igual a 58,44 g/mol, se va a tener la posibilidad de generar 173 gramos de la sal con esta proporción de bifenilos policlorados. La cantidad de sal a la salida es seis veces la que entra al sistema, asumiendo que el aceite que se va a tratar en el país y el analizado por la bibliografía estudiada tiene propiedades similares. Lo anterior se debe a la alta concentración másica de cloruro de sodio en los residuos a pesar de que la única fuente de cloro a la entrada son los PCB's, que se encuentran en proporciones muy bajas.

Debido a que la información proviene de la Compañía que diseñó los sistemas de decloración y regeneración del aceite que se van a utilizar, es imperativo tomar en cuenta este valor como condición crítica y diseñar el sistema de tratamiento de residuos en base al valor máximo de Cloruro de Sodio, en este caso los 1070 gramos de la sal como residuo generado por el lote de 750 litros de aceite contaminado. Se debe tomar en consideración que cada aceite contiene cantidades distintas de hidrocarburos, PCB's, productos de oxidación y demás contaminantes, por lo que la caracterización de los residuos presentes en el análisis de Hodgson (2010) es simplemente una guía de las sustancias que se generan en la decloración. La proporción variará en un ámbito apreciable por lo que los métodos de tratamiento deben ser diseñados con holgura para tomar en consideración esta variación en la concentración de las sustancias.

6.2. Proceso de regeneración del aceite

Luego de que el aceite dieléctrico es descontaminado mediante la decloración, debe proseguir a una etapa de regeneración, donde se eliminan las sustancias que se generaron durante su utilización y no fueron eliminadas en la centrifugación del proceso anterior. El proceso en general consta de un sistema de torres de adsorción en paralelo, un procesamiento térmico y una etapa de reincorporación de aditivos, donde se pasa el aceite en proceso continuo hasta que alcance las propiedades objetivo del producto final mostradas en la norma ASTM 3487. En el Cuadro 6.4 se muestran las propiedades del aceite como producto final que se muestran como requisito mínimo de

calidad en el contrato preliminar que tiene La Compañía con la empresa a la cual se le adjudicó con el proyecto en estudio.

Cuadro 6.4. Propiedades físico-químicas y eléctricas solicitadas para el aceite regenerado

Propiedad	Norma ASTM de referencia	Parámetro de cumplimiento
Apariencia	D 1524	Claro y brillante
Viscosidad a 40 °C (mm ² /s)	D 445	12 máximo
Viscosidad a 100 °C (mm ² /s)	D 445	3 máximo
Número de neutralización (mg KOH/g)	D 974	0,03 máximo
Estabilidad a la oxidación (lodos 72 horas % masa)	D 2440	0,1 máximo
Número de neutralización (72 horas, mg KOH/g)	D 2440	0,3 máximo
Estabilidad a la oxidación (lodos 164 horas % masa)	D 2440	0,2 mínimo
Número de neutralización (164 horas, mg KOH/g)	D 2440	0,4 máximo
Punto de inflamación (°C)	D 92/93	145 mínimo
Punto de fluidez (°C)	D 97	-40 máximo
Punto de Anilina (°C)	D 611	63-84
Color	D 1500	0,5 máximo
Azufre corrosivo	D 1275	Ausente
Contenido de humedad (ppm)	D 1533	35 máximo
Contenido de PCB's (%)	D 4059	No detectable
Tensión interfacial (mN/m)	D 971	40 mínimo
Tensión de ruptura dieléctrica a 60 Hz (kV)	D 877	30 mínimo
Tensión de ruptura dieléctrica de impulso (kV a 25 °C)	D 3300	145 mínimo
Factor de Potencia a 25 °C	D 924	0,05 máximo
Factor de Potencia a 100 °C		0,3 máximo

6.2.1. Sistema de torres de adsorción

Es un sistema de tratamiento con Tierras Fuller, de manera que se eliminen los sólidos gruesos y se recuperen el resto de propiedades como apariencia, color y tensión superficial. El sistema se basa en torres de adsorción en paralelo de manera que se les pueda dar mantenimiento sin detener por

completo el proceso de regeneración, además de que se obtiene una gran zona de transferencia de masa en un volumen reducido.

6.2.1.1. Tierras Fuller

Según la institución denominada British Geological Survey (2006) se definen la Tierras Fuller como arcillas sedimentarias con una gran proporción de minerales del grupo de las esmectitas. Debido a su porosidad y superficie cristalina, esta posee una capacidad propicia para procesos de intercambio iónico y adsorción química en general. Se pueden variar sus propiedades para ser utilizadas en procesos específicos, ya sea cambiando su catión predominante o con procedimiento de regeneración con un químico en particular.

Para el caso de aceite dieléctrico, Gill (2008) muestra que el sistema de Tierras Fuller es apto para la eliminación de algunos coloides, agua libre (parcialmente), ácidos generados durante los procesos de oxidación, sustancias volátiles (VOC's) y lodos que a corto plazo podrían producir que el transformador falle de manera definitiva. La eliminación de estos contaminantes es lo que permite que las propiedades discutidas anteriormente retornen a sus valores originales y aprobados por la norma ASTM correspondiente para aceite dieléctrico. El sistema no puede atrapar aire u otros gases por lo que la utilización del desgasificador mencionado anteriormente se convierte en un equipo primordial en el objetivo de obtener un aceite totalmente regenerado.

En el Cuadro 6.5 se muestran las propiedades características del aceite que se obtuvieron por el método de declorinación mostrado en la investigación de Ferrie, Braun, y John (1982) y el valor de las mismas propiedades luego del sistema de regeneración con Tierras Fuller, de manera que se puede definir los beneficios de la implementación de este sistema de absorción.

Cuadro 6.5 Variación de las propiedades del aceite descontaminado luego del tratamiento con Tierras Fuller

Propiedad	Muestra de aceite declorinado	Muestra tratada con Tierras Fuller
Factor de Potencia a 100 °C (%)	0,64	0,12
Tensión de ruptura dieléctrica a 60 Hz (kV)	16	33
Número de neutralización (mg KOH/g)	0,01	0,01
Tensión interfacial (mN/m)	40	48
Color	-2,0	1,5
Viscosidad a 37,8 °C (mm ² /s)	9,2	9,1
Contenido de PCB's (mg/kg)	2	2

Es importante recalcar que solo se muestran las propiedades que se ven afectadas por el tratamiento con Tierras Fuller, dejando a un lado las que se encuentran dentro del rango establecido por la norma ASTM y no varían luego del proceso de absorción. En el valor de número de neutralización

no se observa un cambio significativo, lo cual implicaría que el aceite no contiene ningún tipo de ácido en su matriz. La empresa estadounidense Allen Filters (2009) define un valor de 0,01 mg KOH/g implica una concentración muy baja de ácidos, por lo que el tratamiento con Tierras Fuller no puede disminuir esta propiedad más allá de este punto crítico.

El cuadro muestra que el parámetro para color es mayor que el máximo establecido de 0,5, por lo que no cumpliría con las características deseadas. Esto no es de preocuparse ya que en la información del sistema de regeneración de la empresa, se menciona que las Tierras de Fuller si logran disminuir el color hasta donde se requiere. Lo anterior implica que la empresa tiene un sistema de Tierras Fuller modificado, los cuales son muy comunes en este tipo de procesos y le brindan propiedades específicas a estos sistemas de adsorción.

6.2.2. Procesamiento térmico

Operación muy similar a la realizada antes de la decloración química, donde se utiliza un desgasificador de vacío en conjunto con un sistema de filtro para despojar al aceite de cualquier impureza que haya acarreado durante sus años en servicio. Los equipos de Redragon S.A (2010) muestran un sistema de termo-vacío, donde se eliminan sólidos pequeños (más de 20 micrómetros), cualquier residuo de agua mezclada proveniente del sistema de centrifugación y sólidos finos (1-2 micrómetros), de manera que se recuperen propiedades específicas como acidez (número de neutralización) y tensión interfacial. La explicación detallada del desgasificador se encuentra en el apartado 6.3 del presente capítulo.

La eliminación de estos sólidos se realiza mediante filtros colocados tanto antes de la fase de calentamiento (20 micrómetros) y luego de la deshidratación y desgasificación del aceite (2 micrómetros). El primero es imperativo para la eliminación de sustancias que afecten la evaporación del agua y calentamiento del aceite, mientras que el segundo se utiliza para eliminar el resto de sustancias contaminantes que afectan de manera directa las propiedades del aceite regidas por las normas ASTM. Este tratamiento es necesario debido a que como mencionan Mangialardi y Paolini (1990) el tamaño de partícula promedio de las Tierras Fuller es de 150-180 micrómetros, por lo que se forman espacios vacíos de tamaño similar y no atraparía sólidos de los tamaños mencionados anteriormente.

6.2.3. Proceso de reincorporación de aditivos

Luego de los procesos anteriores donde se eliminan los agentes generados por envejecimiento del aceite durante su vida útil, se procede a una etapa donde se le agregan nuevamente los aditivos necesarios para su reutilización como material dieléctrico. Los aditivos que se agregan al aceite dependen directamente del fabricante, por lo que no existe una lista general de cuáles deben agregarse como mínimo. Siempre y que se cumpla con las características descritas en la norma ASTM 3487, el fabricante puede utilizar la cantidad y variedad de aditivos que considere necesarios para sus estándares de calidad.

En general los compuestos más comúnmente utilizados y que deben reincorporarse al aceite debido a su posible agotamiento durante su tiempo de vida útil son los antioxidantes y anticorrosivos, por lo que siempre deben agregarse para mantener las propiedades importantes del aceite dentro del rango permitido durante el tiempo estimado de trabajo. Además de estos se analizarán los que se

consideren necesarios para un buen funcionamiento del aceite dieléctrico, pero que la empresa debe contemplar mediante un análisis de costo-beneficio.

6.2.3.1. Antioxidantes

Hidroxi-tolueno butilado (BHT): Rudnick (2009) define al BHT como el agente antioxidante más comúnmente utilizado en aplicaciones industriales y su función radica en interactuar con los radicales libres e hidroperóxidos, de manera que se interrumpa la reacción en cadena que se mencionó en el apartado de ésteres de ácidos grasos y con esto evitar la oxidación del aceite hasta su agotamiento.

EL BHT se clasifica como un fenol impedido y se caracteriza junto al 2,6-di-*tert*-butilfenol como los antioxidantes más volátiles por lo que se reservan para aplicaciones donde la volatilidad no sea de importancia y el fluido se va a utilizar durante mucho tiempo. Otros ejemplos de antioxidantes utilizados para aceites y lubricantes son las diaril-aminas con diferentes grados alquilación, sulfurados fenólicos de doble función y otro fenol impedido como el 4,4'-Metileno-bis(2,6-di-*tert*-butilfenol) que es de los más efectivos por sus propiedades de regeneración de antioxidantes naturales del aceite y su resistencia al cambio de temperatura (Bruce, 2012). Se definió el BHT como el antioxidante del aceite a tratar debido a que se encontró una proporción importante de este en la muestra de aceite nuevo de La Compañía en el análisis GC-MS.

Según Bondet, Brand-Williams, y Berset (1997) el BHT reacciona con los radicales de peróxido de alquilo de manera que detenga la cadena de reacciones que concluyen en la oxidación del aceite, evitando la formación de hidroperóxidos. El mecanismo de reacción se basa en la donación de un átomo de hidrógeno, de manera que el BHT forma un radical con un electrón deslocalizado (cuyo movimiento hacia el grupo metilo es el paso que determina la velocidad de reacción) que mediante interacciones de propagación genera tres tipos de productos, como se muestra en la Figura 6.10.

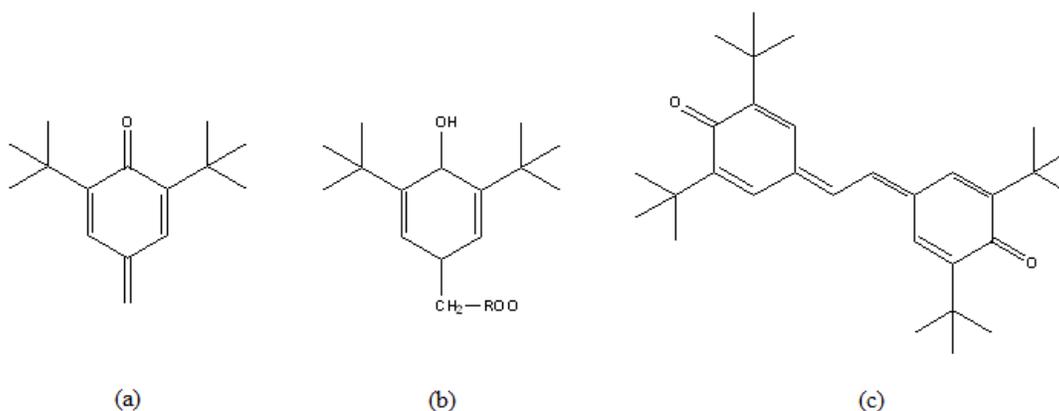


Figura 6.11. Productos de reacción provenientes del antioxidante BHT (realizado en ChemDraw)

Estas sustancias se generan debido a tres tipos de reacción de terminación, mediante la donación de un segundo átomo de hidrógeno a otro radical de peróxido de alquilo (a) formando una cetona, con la reacción del radical proveniente del BHT con el radical de peróxido de alquilo (b) formando un complejo estable y mediante la dimerización o bien condensación de dos radicales de BHT para

luego reacomodar sus dobles enlaces por la acción de cuatro moléculas de radical de peróxido de alquilo (c).

6.2.3.2. Anticorrosivos

El aceite utilizado por la compañía proviene de un sistema de hidrotreatmento que elimina el azufre y nitrógeno presente, sin embargo como se menciona en el trabajo de Lewand (2002) el azufre puede encontrarse presente en los materiales del núcleo del transformador como el cobre, papel de aislamiento y algunas empaquetaduras. No todo el azufre se considera corrosivo pero debido a las altas temperaturas en que trabaja el transformador, existe la posibilidad de activar su reactividad. Esto implica que se provoquen daños en el sistema, en especial en sistema sellados (baja presencia de oxígeno) debido a que genera una preferencia a la reacción con cobre y otros metales.

Según Bruce (2012) se muestra que existen dos tipos de corrosión en este tipo de sistemas, la del mecanismo del hierro y las de metal amarillo. La primera es la más conocida y se basa en la formación de una corriente de electrones de un ánodo a un cátodo, lo que concluye en la generación de Fe_2O_3 hidratado (herrumbre). El aditivo que contrarresta este proceso se formula a partir de varios compuestos como alquifenoles polimetoxilados, sulfonatos, aditivos que contengan fosfatos y del grupo funcional succinimida, aminas poliméricas, entre otros. El inhibidor adecuado formará una capa de protección sobre el metal que lo protege del oxígeno y el agua, por lo que no generará un producto residual indeseado en solución con el aceite. Para el aceite proveniente del tratamiento de los residuos sólidos generados por el descartado de transformadores, es necesario analizar la peligrosidad de estas sustancias.

Para la corrosión de metal amarillo, se necesita un inhibidor distinto ya que el cobre necesita de una capa preliminar de óxido de cobre para que el aditivo pueda adherirse y formar una capa compuesta muy cohesiva que no permite la interacción de ácidos o agua con el metal. Generalmente los derivados de mercaptotiadiazoles doblemente sustituidos con disulfuros protegen el cobre al reaccionar con el azufre activo y formando trisulfuros. La reacción anterior sucede en la capa cohesiva antes mencionada, formando una capa “pasivadora” que contiene un anillo de tiadiazol en la superficie del cobre. Es por lo anterior que estos aditivos deben analizarse para determinar si requieren de un tratamiento especial durante el proceso de descontaminación de residuos sólidos provenientes de los transformadores descartados.

El sistema de regeneración de Redragon S.A (2010) elimina el disulfuro de dibencilo (DBDS), por lo que no existe la necesidad de generar un pasivador al producto tratado. La posibilidad debe analizarse y determinar si en efecto no debe agregarse un agente anticorrosivo al aceite, debido a que aunque se eliminen estas sustancias, esta puede generarse o ingresar al transformador por otros medios.

6.2.3.3. Aditivos complementarios

Bruce (2012) estableció que los aditivos que comúnmente se utilizan para aceite de lubricación, de manera que se pueden extrapolar sus propiedades al sistema de aceite dieléctrico, conociendo de antemano los problemas que afectan a ambos tipos de aceites, como la formación de lodos. Se analizarán las propiedades y beneficios para determinar si deben agregarse al producto final como

complemento de los anteriormente mencionados, o bien como solución a otros problemas no atribuibles a la oxidación o corrosión.

6.2.3.3.1. Aditivos para control de contaminación y sólidos depositados

Para aceites lubricantes generalmente se utilizan detergentes (materiales que contienen metales básicos) para el control de ácidos presentes en el fluido mediante neutralización. Además de lo anterior los detergentes pueden, por una parte, peptizar sólidos pequeños de hasta 20 nanómetros, mientras que por el otro forma películas delgadas alrededor de los precursores de precipitación de sólidos de manera que no se logren aglutinar. Con interacción de superficie y carga, estos aditivos pueden interactuar con sólidos de mayor tamaño (50-1500 nanómetros) previniendo que coagulen y formen partículas más grandes como las que se eliminan en los filtros del desgasificador.

Debido a la utilización del aditivo antioxidante no se deberían tener problemas de formación de ácidos, por lo que es importante determinar si es necesario agregar un aditivo tipo detergente. Sus propiedades lo convierten en una sustancia muy útil, sin embargo ya existen medidas en el sistema de regeneración para eliminar ácidos y sólidos pequeños. La utilización de un detergente podría en cierta manera complementar la acción de los antioxidantes y disminuir la cantidad de sólidos acumulados en los filtros de partículas. Los detergentes son sales que tienen composiciones químicas variadas como sulfonatos, fenatos y salicilatos, y con metales como bario, calcio y magnesio.

6.2.3.3.2. Aditivos para prevenir la formación de lodos y esmaltes

Este tipo de aditivos se denominan dispersantes libres de ceniza, y se utilizan principalmente para eliminar precursores de la formación de lodos y esmaltes por medio de peptización y solubilización, inhibiendo la agregación de partículas por métodos químicos como interferencia estérica o electrostática. Los aditivos de este tipo más comunes son succinimidas, ésteres de succinato o bien grupos funcionales con un extremo de poliisobutileno. Se debe de analizar si este aditivo es muy similar al de control de contaminación o bien atacan partículas distintas, sin embargo por lo general los lodos se forman por sustancias distintas a las que se eliminan con los detergentes, tomando como ejemplo los productos de los aditivos de oxidación.

6.2.3.3.3. Aditivos de inhibición de espuma

Este tipo se utiliza generalmente para sistemas donde el aceite se encuentra en constante agitación, ya que permite la eliminación de aire y otros gases que están atrapados en el líquido y forman espumas debido al movimiento del aceite. Se analiza este aditivo ya que puede mejorar las propiedades de lubricación del aceite y es capaz de eliminar el aire mediante la alteración de la tensión superficial del aceite, facilitando así la separación de las burbujas de aire (y demás gases) de la fase líquida.

Generalmente se agregan en cantidad pequeñas (10-200 ppm) debido a la solubilidad limitada en aceite, además de que si se sobrepasa el límite de concentración se favorece la formación de espuma nuevamente. Este tipo de aditivo ayuda entonces a disminuir la corrosión y oxidación del aceite, ya que elimina el oxígeno que es necesario para ambos procesos. Como mencionan Morcos, Jeffrey, y

Parsinejad (2012) actualmente se utilizan aditivos en base de silicona como el caso de los polimetilsiloxanos, poliacrilatos y poli metacrilatos.

6.3. Análisis de los equipos

La determinación de las características primordiales de los equipos y su relación intrínseca con las operaciones unitarias es una de las fases más importantes para un análisis de proceso. Se debe identificar la función primordial del equipo, sus entradas y salidas tanto de servicio como de materiales, las condiciones normales de operación y cualquier sistema de control que el equipo tenga adecuado.

Tanto las condiciones de operación como la lista de equipos y accesorios se obtuvieron del Manual de Descripción de las Características Generales y de Seguridad de Planta de procesamiento de Aceite PCB 250 generado por la empresa encargado del proceso, mientras que el acomodo de los equipos y los sistemas secundarios de proceso se definieron con la ayuda del diagrama general de la empresa que construyó los equipos. El diagrama generado con la información otorgada por ambas empresas y que define el proceso como un conjunto se muestra en el ANEXO 2.

Debido a que no se cuenta con la información específica de los equipos secundarios como bombas centrifugas y demás sistemas de transporte de fluidos, se aplicaron las siguientes suposiciones con respecto al proceso, de manera que se tenga un punto de partida para el balance de masa presente en el diagrama de flujo de proceso:

- Tuberías de pulgada y media para líquidos y de media pulgada para gases.
- Velocidad de 2 m/s para el aceite dieléctrico y de 0,5 m/s para la dispersión de sodio metálico.
- Una velocidad promedio de 5 m/s para los gases presentes en el proceso.
- Una relación molar de 8:1 para la cantidad de sodio metálico por halógeno reducible.
- Un reciclo del 0,6%, correspondiente a una masa de aceite tres veces mayor a la de sodio metálico.
- Una aumento de presión del 5% en sopladores de gases para su transporte.

Las suposiciones están basadas en las características del equipo y las observaciones de su funcionamiento en la planta canadiense. Además de lo mencionado anteriormente, se calculó el aumento de presión en la bombas centrifugas mediante las curvas de operación de una bomba centrifuga en un sistema cerrado, tal y como se muestra en el trabajo de Karassik (1989). Los datos obtenidos son de orden demostrativo, y pueden analizarse y corregirse fácilmente luego de que se definan las condiciones reales de proceso.

6.3.1. Tanque de dispersión de sodio (V-100)

Consiste en un tanque cilíndrico con tres entradas, una para el sodio metálico en aceite mineral proveniente del cilindro de almacenamiento, otra para la entrada de nitrógeno gaseoso proveniente de su cilindro de almacenaje y finalmente una entrada de aceite limpio, que pasa por un filtro micrométrico y proviene del tanque de sedimentación y retención del aceite tratado a la salida de la centrífuga. Como es sabido el nitrógeno se necesita para crear un ambiente inerte dentro de este tanque, de manera que no exista la posibilidad de una reacción de la humedad del aire con el sodio

metálico. El aceite se agrega de manera que la solución proveniente del cilindro de sodio se mezcle con este (un tipo de lavado de la dispersión) y se naturalice con el aceite a tratar antes de entrar a los tanques de dechlorinación. La función principal del tanque de dispersión es la mezcla de los componentes que ingresan a este, para luego inyectar la cantidad necesaria de solución al sistema de reacción principal, a razón del aceite a tratar en el lote definido, minimizando la cantidad de reactivo necesario.

El sistema cuenta con un tanque de retención de sodio que recibe la dispersión proveniente del cilindro de almacenamiento, lo mezcla el tiempo necesario y luego se bombea al tanque de dispersión para ser mezclado con aceite descontaminado. Este tanque de retención tiene un volumen total de 117 litros y cuenta con un mezclador interno que mantenga la dispersión uniforme. Finalmente la solución mezclada pasa a un cilindro de medición de la dispersión de sodio (V-101) donde se define la cantidad exacta a inyectar a cada tanque de dechlorinación, de manera que la cantidad de sodio remanente luego del lote sea mínima. Lo anterior es importante debido a la dificultad de recuperar el sodio para su reutilización como reactivo y que entre mayor sea la cantidad de sodio, la utilización de agua para eliminarlo de los productos de reacción se vuelve cada vez más riesgosa.

6.3.1.1. Sistema de control y seguridad del tanque de dispersión

El tanque de retención cuenta con un sistema de transmisión de nivel continuo, además de una señal de nivel alto. Lo anterior se utiliza para controlar a cabalidad el nivel de mezcla en el sistema y evitar presiones elevadas debido a un sobrellenado del tanque.

El cilindro de medición cuenta también con un transmisor de nivel continuo y un interruptor de alto nivel con las mismas funciones que los anteriores, de manera que se eviten riesgos de ruptura o daño a una bomba por acumulación de flujo dentro del equipo.

6.3.2. Desgasificador (E-100)

Este equipo cuenta con calentadores eléctricos que eliminan el agua contenida en el aceite del transformador por medio de la evaporación de esta, elevando la temperatura en aproximadamente 20 °C por encima de la temperatura ambiente. El calentamiento también ayuda a disminuir la viscosidad del aceite y con esto potenciar su fluidez y capacidad para eliminar los gases atrapados dentro de este, permitiendo a su vez presiones de trabajo relativamente bajas.

El secado se realiza en una cámara de vacío recubierta de fibra de vidrio de manera que se promueva la eficiencia de la transferencia de calor, y a su vez no permite que aire húmedo del exterior provoque una hidratación del aceite antes de que sea bombeado a los tanques de dechlorinación. El sistema cuenta entonces con una entrada de aceite con agua, una salida de aceite deshidratado hacia los tanques de reacción y una salida de vapor de agua y otros gases que se conecta a válvulas de mariposa y una bomba de vacío, de manera que se permita la salida de este sin riesgo de entrada del aire del entorno. La baja presión también potencia la remoción de los gases adsorbidos en el aceite, que luego son eliminados a través del escape de la bomba de vacío.

La importancia de la eliminación del agua y producción de un vacío en el aceite es que la humedad y el aire aceleran las reacciones de oxidación y afectan algunas propiedades como la tensión de

ruptura dieléctrica, factor de potencia, número de neutralización y por supuesto el contenido de humedad. Es por lo anterior que el proceso se realiza tanto antes como después de la declorinación, de manera que los niveles de contaminación se mantengan lo más bajos posibles (Allen Filters, 2009).

Un beneficio de la producción de vapor de agua durante su eliminación es que es el gas insoluble más utilizado para remover gases disueltos en agua, por lo que su capacidad de extracción puede determinarse como una desgasificación de un aceite mineral. La producción de vapor aumenta la eficacia del equipo y su modelo de eliminación de gases a través de transferencia de calor (Rivera, 2002).

6.3.2.1. Sistema de control y seguridad del desgasificador

El equipo cuenta con un calentador controlado por una termocupla (T/C-1) y un controlador, de manera que se mantenga la temperatura de salida del aceite en el valor requerido.

6.3.3. Tanques de declorinación (R-100)

Los dos tanques son el sistema principal del proceso, ya que es donde se realiza la reacción de declorinación. Los tanques son además los equipos más complejos, pues constan de un recipiente cilíndrico agitado, con varias entradas y salidas a razón de las sustancias que se necesitan para la reacción. Cada reactor cuenta con entradas para el nitrógeno de manera que se cree un ambiente neutro y no exista riesgo de reacción del aire con el sodio, una entrada el aceite deshidratado proveniente del desgasificador, una entrada de solución de sodio metálico en aceite proveniente del tanque de dispersión, otra entrada proveniente del cilindro de almacenamiento de sodio en caso de necesitarse y finalmente un sistema de recirculación de aceite que permita el recalentamiento de este, para así mantener la temperatura de reacción en un ámbito adecuado.

Los tanques cuentan con una salida de vapores y aire, de manera que no exista un aumento de presión a la hora de desplazar del aire dentro del sistema antes del inicio del lote, o bien la descarga de vapores generados durante la reacción. Los gases llegan a un enfriador de aire, para luego pasar a un tanque de condensación (V-103) para recoger cualquier vapor de PCB's que puede haberse escapado de los reactores. Finalmente cada tanque cuenta con una ventila atmosférica con filtros de carbono, para liberar el aire atrapado y demás vapores que no sean peligrosos y logren separarse de los otros vapores condensados mediante métodos físicos. La otra salida de los tanques de reacción es la del producto final, conformado por el aceite totalmente declorinado y los demás productos secundarios, que se dirigirán hacia la centrífuga de separación.

Como sistema complementario, los reactores cuentan con un calentador de recirculación de aceite, de manera que la temperatura se mantenga constante durante el tiempo de reacción. Es imperativo que la reacción se mantenga en 88°C, primeramente para que se acelere la reacción y se sobrepase la energía de activación necesaria para separar el ion cloruro, y luego no puede elevarse mucho debido a la formación de gases inflamables a la temperatura de inflamación del aceite mineral (aproximadamente 146°C). Como se muestra en la investigación de Meshkatoddini (2008) la degradación del aceite ocurre a temperaturas por encima de 120°C y genera sustancias inflamables como hidrógeno y contaminantes como el dióxido de carbono y monóxido de carbono.

Además del calentador, se tiene un tanque de agua conectado a ambos reactores a través de una bomba hidráulica, en caso de necesitarlo. Aunque la reacción debe realizarse en condiciones de cero humedad, se puede necesitar inyectar agua en caso de limpieza de un reactor, además de utilizar el agua como mecanismo de eliminación de cualquier partícula de sodio remanente. Como menciona Kobelco (2007) la dispersión de sodio en mezcla con el aceite tratado dentro de cada reactor reacciona de forma menos abrupta que el sodio metálico, debido a su forma granulada y el hecho de siempre estar cubiertas de aceite. Debido a lo anterior la reacción se detiene dentro de los tanques de declorinación y en caso de producirse gas hidrógeno, este se transportaría junto con los demás volátiles al sistema de tratamiento de gases.

6.3.3.1. Sistema de control y seguridad de los tanques de reacción

El calentador de los tanques cuenta con una termocupla (T/C-2) que controla la temperatura dentro de cada reactor a razón de la recirculación de aceite. Esta señal se analiza en un controlador programable que analiza si el sistema se encuentra en las condiciones de diseño y operatividad correctas.

6.3.4. Centrífuga (S-100)

Este equipo se encarga de separar el aceite declorinado de los demás productos de reacción, a razón de las diferencias de densidad entre estos. Debido a que el 60% del residuo es soluble en agua, se utiliza una corriente de esta para separar la mayoría de las sustancias por solubilidad, mientras que los otros residuos (generalmente en estado sólido) se separan del aceite solamente por el efecto de la fuerza centrífuga.

Como se menciona anteriormente el equipo cuenta con dos entradas, la de agua y la de la mezcla de productos provenientes de los reactores. Por el otro extremo del equipo sale el agua de arrastre con todas las sustancias solubles en esta, y por la otra salida el aceite limpio y preparado para entrar al sistema de regeneración. Dentro del equipo se encuentra un tanque receptor de lodos y sólidos, colocado bajo la zona de proceso de manera que las sustancias pesadas se acumulen y separen de la fase acuosa.

Cabe destacar que no existe riesgo de la reacción violenta del agua de lavado con el reactivo de sodio, debido a que este fue eliminado en los tanques de declorinación como se mencionó anteriormente.

La cantidad de agua de lavado es un parámetro que se define a partir de la relación aceite/agua, sin embargo no existe un valor específico para una cantidad de aceite y sólidos definidos. Klasson (2000) muestra que un rango común para la relación aceite/agua es de 10:1 a 1:10, por lo que es complicado definir la cantidad de agua a agregar. Lo anterior se debe a que el aceite va a contener un poco de esta sustancia luego de detener la reacción en los tanques de declorinación. Para el diseño del sistema de tratamiento de residuos deberá de definirse un flujo específico para un lavado eficiente del aceite y los sólidos presentes en este, de manera que se pueda tener una idea general del flujo de aguas residuales que deben tratarse.

La centrífuga cuenta con dos tanques complementarios, donde uno es donde se acumula el lodo removido del aceite descontaminado, mientras que el otro (V-105) es donde se colecta el aceite

procesado por la centrífuga, libre de subproductos no deseados, antes de ser bombeado al sistema de regeneración.

6.3.4.1. Sistema de control y seguridad de la centrífuga

En el tanque de lodos de la centrífuga se tienen interruptores de alto y bajo nivel, de manera que se tenga un control asociado a la bomba de descarga de lodos (P-111) y se permita la salida de estos cuando el volumen de estos alcanzó un nivel especificado.

En el tanque de aceite procesado (V-105) se tienen cuatro interruptores de nivel, los de nivel bajo y alto como los del tanque mencionado anteriormente, y dos interruptores que definen niveles de operación deseados. Los dos primeros cumplen el mismo objetivo de control y seguridad que los del tanque de lodos (el sistema debe trabajar dentro del rango de operación determinado entre los niveles de operación 1 y 2), mientras que los otros definen las condiciones de proceso que se requieren para el funcionamiento correcto de los equipos, en especial el sistema de regeneración del aceite descontaminado.

6.3.5. Torres de absorción de Tierra Fuller (T-100)

Como se mencionó anteriormente, la regeneración se lleva a cabo mediante columnas de absorción cilíndricas totalmente selladas, las cual cuentan con una entrada para aceite y otra para el líquido de lavado y regeneración. Por debajo tienen una salida que conecta a una tubería común donde el aceite de todas las torres se une y puede pasar a la siguiente etapa. La distribución espacial de tuberías y ensamblaje están diseñados de manera que se pueda colocar el número de torres necesarias para la cantidad de aceite a tratar.

6.3.5.1. Sistema de control y seguridad de las torres de Tierras Fuller

Cada columna cuenta con una válvula en su parte superior, en caso de requerirse ya sea para liberar presión o introducir una sustancia o disolvente específico de lavado. Fuera de lo anterior solamente se tienen los medidores de presión a la entrada del aceite y la estructura metálica que sujeta las torres de varios lugares distintos de manera que se mantengan en su sitio.

CAPÍTULO VII: ANÁLISIS DEL TRATAMIENTO DE LOS RESIDUOS

7.1. Análisis y caracterización de los residuos

Debido al proceso de declorinación del aceite contaminado, se producirán ciertos residuos no deseados, además del aceite libre de sustancias cloradas. En el Cuadro 6.3 se presentó la separación de estos productos y su porcentaje masa correspondiente, para un lote de 750 litros de aceite contaminado con una concentración mayor a 50 ppm de PCB's. Los residuos no deseados se separan por medio de centrifugación, de manera que las diferencias de densidad permitan obtener el aceite descontaminado libre de impurezas y transportarlo a la etapa de regeneración del mismo.

La empresa encargada del proceso tiene como opción principal la incineración de estos residuos de manera que sean tratados en otra empresa con mejor infraestructura y capacitación para este tipo de manejo de residuos. No obstante estos residuos se encuentran conjugados en una mezcla lodo-agua residual, de manera que debe diseñarse un sistema de separación adecuado. Realizando un análisis por separado es posible caracterizar estos productos y también determinar si es posible disponer de estos de una manera más sencilla con el equipo existente o mediante una inversión aceptable, o bien buscarles un uso alternativo para tener una recuperación de capital monetario.

A continuación se realizará una caracterización de cada residuo por separado, investigando sus propiedades más importantes a razón de un tratamiento de residuos, para así determinar la disposición o uso más eficaz que se le puede aplicar a estos productos secundarios.

7.1.1. Aceite descontaminado

Este es el aceite que se encuentra junto con el agua de lavado a la salida de la fase acuosa, debido a ineficiencias del proceso de centrifugación. La masa de este aceite residual no representa ni el 1% del aceite total tratado, por lo que es seguro definir la conclusión anterior. Cabe destacar que este residuo no debe ser tratado o vertido en un relleno sanitario, sino que se ingresará junto con el producto principal de la separación al sistema de regeneración de aceite dieléctrico.

Asumiendo que este aceite cuenta con las mismas propiedades químicas que el aceite nuevo, se tiene que según su hoja de seguridad (2002) el aceite es un líquido a temperatura ambiente, insoluble en agua y con una gravedad específica de 0,88.

7.1.2. Cloruro de Sodio

Conocido además como sal común o sal de mesa, este compuesto es parte de la dieta del ser humano y no presenta ningún tipo de toxicidad importante. Se encuentra en estado sólido a la temperatura de operación y es bastante soluble en agua o cualquier solvente similar, donde un gramo puede disolverse en 2.8 mililitros de agua a 25 °C. La densidad de este sólido cristalino es de 2165 kg/m³, su punto de fusión es de 801 °C y es relativamente estable en términos de uso y almacenamiento normales (Naidu, 2000).

Es el producto secundario de mayor importancia debido a su concentración a la salida del proceso, pero al no presentar ningún tipo de potencial riesgo ambiental, no necesita ningún tipo de

procesamiento para su disposición final. Esta sustancia podría sin ningún problema ser enviada a un relleno sanitario nacional con el resto de la basura ordinaria generada en la empresa.

Según la investigación del Ministerio de Economía, Industria y Comercio (2012), su valor en el mercado de nuestro país no es muy elevado (máximo de 275 colones por 500 gramos) por lo que realizar un proceso de separación y purificación de esta sal podría resultar en una pérdida de dinero aún con el capital ganado de su venta en el mercado costarricense. Otro inconveniente es que la sal proviene de un proceso con sustancias peligrosas, por lo que los costos de purificación son elevados y su origen resultaría poco atractivo para el mercado nacional.

7.1.3. Hidróxido de sodio

Es un compuesto químico muy común en la industria, sólido a la temperatura de operación pero muy soluble en agua, de manera que comienza a formar gotas de líquido rápidamente al estar en contacto con el aire húmedo. La densidad de esta sustancia es de 2123,7 kg/m³ y su punto de fusión es de 318.14 °C (Perry & Green, 2008), mientras que su solubilidad en agua es de 1090 gramos por litro de agua (International Programme of Chemical Safety, 2010).

7.1.4. Carbonato de sodio

Según Lewis (1998) es una sustancia sólida a temperatura ambiente, que en la naturaleza solo se encuentra en uno de sus estados hidratados. Se utiliza en procesos industriales de manufactura de sales de sodio, jabón y vidrio, además de ser un medio de contención de derrames de sodio metálico muy efectivo.

La densidad del carbonato de sodio es 2532 kg/m³ y su punto de fusión es de 851 °C, mientras que la solubilidad es de 106 gramos por litro de agua a 20 °C (Sigma Aldrich, 2014) por lo que puede considerarse como totalmente soluble a la temperatura de trabajo del sistema. Es importante mencionar que en contacto con agua realiza la siguiente reacción para formar ácido carbónico:



Sin embargo, al tener una cantidad mucho mayor de hidróxido de sodio en la fase acuosa, se presenta la reacción inversa, manteniendo el carbonato de sodio en su estado basal. Se debe entonces definir un tratamiento para eliminar el carbonato del agua residual, sin preocuparse que una parte de este se haya convertido en ácido carbónico.

7.1.5. Ésteres de ácidos grasos

Debido al mecanismo de la reacción de oxidación de los hidrocarburos, el grupo que sustituye el hidrógeno del grupo carboxilo debe ser de al menos cinco carbonos, ya que es la cadena más corta presente en el aceite dieléctrico. A medida que aumenta la cantidad de carbonos en el grupo sustituyente, es más complicado obtener información de la sustancia resultante, por lo que se estudiarán los ésteres etílicos para determinar el o los estados de agregación posible(s) y el rango de densidad de estas sustancias según el número de carbonos total.

Como se muestra en su hoja de seguridad (2014) para el palmitato de etilo que tiene un número intermedio de carbonos, se tiene una densidad de 854,5 kg/m³ y un punto de fusión promedio de 25

°C. Es por lo anterior que puede encontrar en estado sólido, líquido o una mezcla de ambos a razón de la temperatura dentro de la centrifuga.

En el Cuadro 7.2 se muestra la siguiente información de punto de fusión y densidad para una serie de ésteres con distintas cadenas hidrocarbonadas recopilada por la Royal Society of Chemistry (2014). Es complicado determinar una relación específica sobre número de carbonos y las características de cada posible éster, ya que pueden ser una mezcla compleja con distinto número de carbonos en cadena y sustituciones variadas.

Cuadro 7.1. Punto de fusión y densidad de algunos ésteres de ácidos grasos etilo sustituidos

Éster de ácido graso	Número de carbonos	Punto de fusión /(°C)	Densidad /(kg/m³)
Decanoato de etilo	12	-20	859,45
Miristato de etilo	16	12	857,46
Palmitato de etilo	18	22-26	854,5
Estearato de etilo	20	33-36	1053,9

Como se puede observar, a razón de los ésteres de ácidos grasos formados se pueden tener residuos sólidos o líquidos, los cuales pueden pertenecer a cualquiera de las tres fases formadas en la centrifuga según su densidad. La acción de la gravedad no será una fuerza motriz determinante en la separación de estas sustancias de los demás residuos.

Su afinidad con el aceite sin embargo determinará una preferencia química de manera que la mayoría se encontrará en la fase aceitosa, incluyendo los de mayor densidad ya que generalmente serán los de mayor número de carbonos en cadena. Como mencionan Yalkowsky, He, y Jain (2010) la solubilidad en agua inclusive de un éster pequeño como el del caproato de etilo es insignificante (0,65 g/l), por lo que sería la fuerza motriz para separar y mantener los ésteres de ácidos grasos en su mayoría dentro de la fase aceitosa.

Las conclusiones anteriores implican que independientemente de su densidad o estado de agregación, los ésteres de ácidos grasos se encontrarán en su gran mayoría dentro de la fase aceitosa. Lo anterior es cierto inclusive para ésteres de alto peso molecular, ya que esto implicaría una mayor afinidad con la mezcla hidrocarbonada y una solubilidad en el agua mucho menor a la de los ésteres etílicos.

7.1.6. Sodio saponificado

Como se encuentra en su hoja de seguridad (2014), las sales de sodio que se pueden formar a partir de los ésteres de ácidos grasos son sólidas a temperatura ambiente (inclusive las de cadena más corta como el caprilato de sodio con ocho carbonos totales). Tiene una textura de polvo blanco y altos puntos de fusión (283 °C -290 °C para el palmitato de sodio) inclusive para compuestos tan pequeños como el octanoato de sodio, que según la base de datos de Chemical Book (2007) tiene un punto de fusión de aproximadamente 245 °C.

Independientemente de la cantidad de carbonos, es importante definir que debido a su conformación química, las sales de sodio son relativamente solubles en agua, por la fuerza iónica importante del par oxígeno-sodio. Según Sigma-Aldrich (2014) el decanoato de sodio es soluble en agua (100 g/l)

mientras que en la farmacopea de Europa (2004) se especifica el estearato de sodio como ligeramente soluble, como es esperado al aumentar el número de carbonos en la cadena hidrocarbonada.

Debido a la gran cantidad de agua en comparación con la cantidad de sales de sodio en la mezcla residual, se asumirá que estas sustancias se solubilizarán parcialmente en el agua de lavado pero saldrán mayoritariamente con la fase aceitosa por efectos electrostáticos del cloruro de sodio. Como se menciona Chauhan (2013) los jabones (incluyendo las sales de sodio) son más ligeros que el agua, por lo que siempre tendrán una densidad menor a la de este líquido.

7.1.7. Residuos no saponificables

Como se mencionó en el análisis del proceso, estos consisten mayoritariamente en polvo, partículas metálicas (cobre y hierro), ácidos carboxílicos, cetonas y productos generados por la utilización de aditivos. Debido a la diversidad de sustancias en esta categoría, se generará una caracterización de estas con las propiedades de importancia para un proceso de separación tal y como se muestra en el Cuadro 7.3. Las propiedades de los metales se obtuvieron de (Weber, 2003).

Cabe destacar que las sustancias denominadas como fase pesada son las de tamaño de partícula mayor a 20 micrómetros, ya que el sistema completo cuenta con filtros de este tamaño y de 1 a 2 micrómetros, de manera que es esperable la contaminación del aceite con partículas de este rango. Las partículas de 1 micrómetro pueden ser atrapadas por fuerzas moleculares y electrostáticas como se da con los coloides, mientras que la permanencia de las de mayor tamaño se debe a la no idealidad del proceso y fuerzas viscosas presentes en el aceite.

Los ácidos que se encuentran mayoritariamente en el aceite son los carboxílicos, que comúnmente se denominan como ácidos grasos. Al igual que lo ésteres u sales antes estudiadas, estos pueden variar en su cantidad de carbonos hasta formar una mezcla compleja similar a la del aceite original. Como destacan Zamora y Hidalgo (2004) todos los ácidos grasos desde 4 a 26 carbonos son menos densos que el agua a 20 °C y en su gran mayoría son sólidos a temperatura ambiente.

La solubilidad de los ácidos grasos en agua es generalmente baja, disminuyendo con la cantidad de carbonos y la falta de insaturaciones en la molécula. Debido a las características antes mencionadas, se esperaría que este tipo de residuo en particular se encuentre en la fase aceitosa luego de la separación en la centrifuga.

A pesar de lo anterior, la presencia de sales de sodio y su acción de solubilización de grasas produciría que una cantidad importante de ácidos grasos fueran atrapados en la matriz acuosa y salieran de la centrifuga junto con el agua de lavado. Dependiendo de la concentración de sales de sodio en los residuos, va a ser necesaria la formulación de un método de tratamiento de aguas jabonosas.

En el caso de las cetonas, estas se forman a partir de los ácidos carboxílicos durante los procesos de oxidación del aceite, reemplazando el grupo alcohol por compuestos hidrocarbonados. En la investigación de Mackay, Wan Ying, y Kuo-Ching (2006) se muestra que la solubilidad disminuye directamente con el aumento del número de carbonos, y que a partir de la heptanona pueden

considerarse como insolubles. Lo anterior implica que cualquier tipo de cetona que se formen por oxidación del aceite, serán insolubles en agua y formarán parte de la fase aceitosa.

Según la base de datos de GuideChem (2012) se muestran sus propiedades químicas de la 12-tricosanona ($C_{23}H_{46}O$), con una gravedad específica de 0,835 y un punto de fusión de 68 °C. Estas características muestran que las cetonas en estudio pueden encontrarse tanto en estado sólido como líquido a razón de la cantidad de carbonos, además de asumir que siempre serán menos densas que el agua. Debido a lo anterior se concluye que estas sustancias se presentarán solamente en la fase aceitosa.

Como establecen Seinfeld y Pandis (2012) el polvo es una mezcla compuesta de minerales como cuarzo, arcillas, calcita, yeso y óxidos de hierro. Su origen puede ser tanto natural como antropogénico, y su tamaño de partícula oscila entre 0.1 μm -10 μm . Debido a lo anterior se esperan problemas de partículas de polvo coloidal dispersas en el aceite o agua, ya que como define Allen (2013) las dispersiones coloides se generan en un rango de 1 nm a 1 μm . Cabe destacar que no es de suma importancia determinar la densidad, solubilidad y punto de fusión del polvo o sus minerales constituyentes, puesto que se conoce de antemano su estado de agregación e insolubilidad.

Cuadro 7.2. Caracterización de los componentes mayoritarios de los residuos no saponificables

Sustancia	Densidad a 25 °C /(kg/m ³)	Punto de fusión /(°C)	Solubilidad en agua /(g/l)	Estado de agregación
Cobre	8960	1084,6	Insoluble	Sólido
Hierro	7870	1538	Insoluble	Sólido
Ácidos grasos	817,6-937,22	-7,9-87,9	Insoluble	Líquido/Sólido
Cetonas	<1000	-	Insoluble	Líquido/Sólido
Polvo	>1000	-	Insoluble	Sólido
Productos de aditivos	-	-	-	-

7.1.8. Asfaltos y Alquitranes

El asfalto es un sólido o líquido viscoso color negro o café oscuro, cuya densidad varía entre 1000 y 1800 kg/m³, además de ser totalmente insoluble en agua. Su punto de fusión depende de la mezcla específica de hidrocarburos, pero se encuentra entre 54 °C y 173 °C (Wes, Olsen, & Sweeney, 2004). Es complicado definir qué tipo de asfalto es el que se genera durante el proceso de dechlorinación, por lo que se tomarán las propiedades del asfalto regular (número de CAS: 8052-42-4) como las reales para el residuo generado.

Melber, Kielhorn, y Mangelsdorf (2004) definen los alquitranes (creosota) como un líquido aceitoso, color café amarillento, con un olor agudo y con un punto de fusión aproximado de 20 °C. Su densidad está en el rango de 1000 kg/m³ a 1700 kg/m³ y se menciona como ligeramente soluble o prácticamente inmisible en agua.

7.2. Tramitología asociada al tratamiento y disposición final de residuos sólidos y líquidos

Existe un reglamento específico en el país para la regulación del vertido de aguas residuales en cuerpos de agua, de manera que el impacto ambiental asociado se pueda minimizar hasta

parámetros específicos que permitan una recuperación y reversibilidad del efecto en forma natural. Debido a la naturaleza de los productos del proceso, los parámetros a tomar en cuenta son los sólidos suspendidos totales (SST), sólidos sedimentables (SSed), potencial de hidrógeno (pH), demanda química de oxígeno (DQO) y temperatura. Los primeros dos deben analizarse debido a la gran variedad de sólidos solubles en agua presentes en los residuos de la decoloración (carbonato de sodio, cloruro de sodio, entre otros), el potencial de hidrogeno debido a la presencia de hidróxido de sodio, la DQO debido a la presencia de sustancias oxidables, y la temperatura debe controlarse puesto que se aumenta de manera importante en el reactor de decoloración.

Como se encuentra en el Reglamento de vertido y reuso de aguas residuales (2007) los parámetros máximos permisibles se muestran en el Cuadro 7.4 para disposición de aguas residuales en alcantarillado sanitario. Además de lo determinado anteriormente se tomará en cuenta la cantidad máxima de cloruros, de manera que se analice la cantidad del ion en disolución y no solamente la sal como un sólido disuelto.

Cuadro 7.3. Límites máximos para los parámetros del agua residual según el Reglamento Nacional

Parámetro	Límite máximo
DQO	1000 ppm
Sólidos disueltos	1500 ppm
Sólidos suspendidos	500 ppm
Sólidos sedimentables	1 ml/l
Potencial de hidrógeno	6-9
Temperatura	<40 °C
Cloruros	500 ppm

Debido a que el proceso no se ha implementado en el país, no es posible medir un valor representativo del parámetro DQO. A pesar de tener una definición específica es muy complicado determinar el valor de demanda química de oxígeno con la caracterización de las aguas residuales de manera teórica (Mora, 2014). Por lo anterior no se analizará el parámetro DQO pero se utilizarán los demás para definir lo mejor posible el agua residual del proceso, y con el tratamiento de sólidos totales se espera que el parámetro de DQO baje sustancialmente hasta valores por debajo del permitido por el Reglamento.

7.3. Clasificación preliminar y peligrosidad de los residuos

Uno de los aspectos más importantes del tratamiento de residuos es su clasificación y separación, de manera que se puedan procesar adecuadamente y definir su disposición final a razón de su peligrosidad. En el país el tema de procesamiento y vertido responsable de los residuos y desechos en general está muy poco desarrollado, a tal punto que fuera de algunas empresas responsabilizadas por sus propios desechos e ideas formuladas pero que no salen del papel, la disposición final siempre ha tenido el común denominador de los rellenos sanitarios. Las leyes sobre identificación, clasificación, tratamiento y disposición de los residuos son extensas y variadas, pero la regulación y aplicación de estas distan de ser una realidad similar a lo que se tiene estipulado en los reglamentos.

Tomando en cuenta lo anterior, la empresa que realizará el proyecto de descontaminación y regeneración de los aceites contaminados con bifenilos policlorados, tiene planeado subcontratar los

tratamientos de la mayoría de los desechos generados en el tanque de decoloración. Lo anterior de manera que reciban un tratamiento adecuado en una empresa con las características e infraestructura necesarias para realizarlo. El objetivo del análisis siguiente es la formulación de un procedimiento de separación, tratamiento y vertido de los residuos generados para que estos puedan ser procesados dentro de la misma empresa, como alternativa contra el costo monetario de un tratamiento realizado por otra empresa.

El tema más importante es definir cuáles de los residuos analizados anteriormente pueden ser transportados a un relleno sanitario para su disposición final, tomando en cuenta la regulación legal de estos sitios en el país. El Reglamento 27378-S sobre rellenos sanitarios, cuenta con un solo artículo (16) para los desechos industriales donde menciona que podrán ser dispuestos en un relleno sanitario solamente si son tratados o neutralizados de manera que sean asimilables a desechos ordinarios o inocuos (Reglamento 27378-S sobre Rellenos Sanitarios, 1998), o bien depositarse en una zona especializada de un relleno sanitario para ese fin.

Tomando en consideración la información anterior y las propiedades de los rellenos sanitarios actualmente funcionando en el país, se llega a la conclusión de que la única manera de verter los residuos producidos en el proceso, es si estos se tratan de manera que pierdan su peligrosidad de manera completa, o al menos hasta el punto en que no presenten un peligro para la salud pública ni el medio ambiente.

En el cuadro 7.5 se muestra la peligrosidad asociada a cada residuo en estudio, de manera que se establezca cuáles pueden ser vertidos en un relleno sanitario inmediatamente después de la separación, y cuáles deben ser tratados posteriormente de manera que se pueda realizar su vertido final. La información de peligrosidad se tomó de las hojas de seguridad generadas por Sigma-Aldrich (2014), a menos que se mencione lo contrario.

Cuadro 7.4. Residuos del proceso que pueden verterse en rellenos sanitarios regulares

Sustancia	Peligrosidad	Tratamiento o Disposición
Cloruro de sodio	Ninguna de importancia	Disposición directa en relleno sanitario
Sodio saponificado	No presentaban ningún tipo de peligrosidad apreciable, a excepción del palmitato de sodio que puede ser irritante para los ojos.	Disposición directa en relleno sanitario
Hidróxido de sodio	Corrosivo, causa irritación en la piel y fosas nasales. De ser vertido en un cuerpo de agua puede afectar el pH de esta.	Neutralización
Ésteres de ácidos grasos	Similares químicamente al biodiesel, estas sustancias son biodegradables y no tóxicas (Erham, Adhvaryu, & Sharma, 2005)	Disposición directa en relleno sanitario

Cuadro 7.4. (Continuación) Residuos del proceso que pueden verterse en rellenos sanitarios regulares

Sustancia	Peligrosidad	Tratamiento o Disposición
Carbonato de sodio	No presenta una toxicidad apreciable, aunque puede irritar severamente los ojos.	Neutralización
Asfaltos y alquitranes	Los vapores emitidos pueden generar irritación en ojos y sistema respiratorio. Pueden contener hidrocarburos aromáticos policíclicos (Melber, Kielhorn, & Mangelsdorf, 2004)	Tratamiento en horno cementero
Aceite descontaminado	No presenta una peligrosidad importante, sin embargo tiene una persistencia importante (TEXACO, 2002).	Reingreso a proceso
Cetonas	No presenta una peligrosidad importante	Tratamiento con Tierras Fuller
Partículas metálicas y polvo	Residuos no peligrosos	Disposición directa en relleno sanitario
Ácidos grasos	Residuos no peligrosos Posibles afectaciones	Tratamiento con Tierras Fuller
Productos de aditivos	carcinogénicas y de genotoxicidad	Tratamiento con Tierras Fuller

Como se mencionó en el análisis de proceso, el único aditivo que genera productos libres en el aceite es el hidroxitolueno butilado (BHT), formando tres tipos de compuestos que se muestran en la Figura 6.10. Según el Panel on Food Additives and Nutrient Sources added to Food (2012) se muestra un análisis del BHT como aditivo en alimentos, uno de los usos más comunes para este antioxidante. En ese estudio se menciona que la utilización del BHT no implica un riesgo toxicológico importante (incluyendo la formación de los productos antes mencionados) a pesar de que investigaciones anteriores han establecido riesgos de gen-toxicidad y carcinogénicos.

7.4. Separación de los residuos

Debido a la diversidad de residuos producidos y sus características tan variadas, es necesario realizar una separación si se desea obtener algún beneficio de alguno de estos, o simplemente para realizar un tratamiento diferenciado para cada componente. En el Cuadro 7.6 se muestra un cuadro resumen de la caracterización de los residuos y las propiedades de mayor importancia a la hora de realizar un análisis de separación.

Cuadro 7.5. Resumen de la caracterización de los residuos del proceso de dechlorinación

Sustancia	Densidad /(kg/m³)	Punto de fusión /(°C)	Solubilidad en agua /(g/l)	Estado de agregación
Aceite descontaminado	880	-	Insoluble	Líquido
Cloruro de sodio	2165	80	357.14	Sólido
Hidróxido de sodio	2123.7	318.14	1090	Sólido
Ésteres de ácidos grasos	800-1053,87	-	Insoluble	Sólido/Líquido
Carbonato de sodio	2532	851	106	Sólido
Sodio saponificado	>1000	>200	Soluble	Sólido
Asfaltos y alquitranes	1000-1800	20-173	Insoluble	Líquido

La densidad es necesaria para determinar si se pueden realizar separaciones por centrifugación o sedimentación, la solubilidad en agua para analizar procedimientos de lixiviación u extracción, la temperatura de fusión para determinar el estado de agregación y la posibilidad de separación por destilación y finalmente el estado de agregación es importante para determinar la operación unitaria que mejor se acople al sistema de separación y las sustancias relacionadas.

7.4.1. Separación primaria: Centrifugación

En este proceso se forman varias fases debido a las diferencias de densidad, solubilidad en agua y composición química. El aceite, por su baja densidad y no solubilidad en agua, forma una fase líquida única que puede ser separada fácilmente de las otras por centrifugación, lo cual es el objetivo principal de este equipo en el proceso. La otra mezcla de residuos denominada “lodos” se divide en la fase acuosa conteniendo las sustancias solubles en agua (cloruro de sodio, carbonato de sodio e hidróxido de sodio) y una fase pesada (partículas de polvo y metales, asfaltos y alquitranes) la cual se presenta en muy pequeñas cantidades.

Debido a lo mencionado anteriormente, el aceite es pues la fase más ligera (gravedad específica menor a la unidad) y permanece en la parte alta de la centrífuga, y se puede separar con una eficiencia muy alta por el efecto combinado de la fuerza centrífuga y el hecho de que ambas fases son del todo inmiscibles.

La separación del agua y los lodos es más complicada, debido a que ambas fases contienen varios residuos mezclados y de naturaleza similar. La centrífuga contiene un receptor de sólidos el cual atraparán estos y los separará mecánicamente durante el proceso de separación principal.

7.4.1.1. Fase aceitosa

Esta fase es la más ligera, constituida por una cantidad importante de aceite atrapado por las otras fases y que se separó por la no idealidad del proceso. Junto con este se encuentran los ésteres de ácidos grasos, por lo que para un Batch de 750 litros se generarán 1,752 kilogramos de fase aceitosa. Para una densidad promedio de los ésteres de ácidos grasos de 906 kg/m³, se tendrá un

volumen estimado de 31 mililitros de ésteres. Otros residuos que pueden estar presentes en disolución son las cetonas y ácidos grasos, dependiendo del porcentaje de oxidación del aceite y del proceso de separación con centrifuga.

7.4.1.2. Fase acuosa

El fluido utilizado para realizar la separación de fases (conjuntamente con la fuerza centrífuga) es el agua, en un principio para obtener todo los residuos solubles en este líquido en una sola matriz independiente y seguidamente para separar la fase ligera de la fase pesada. La cantidad necesaria de agua depende de cuánto aceite quiera tratarse dentro de la centrifuga, pero puede calcularse un valor mínimo a razón de las solubilidades de los residuos pertinentes.

Con la concentración de los residuos solubles en agua presentada en el Cuadro 7.1 y sus valores de solubilidad mostrados en el Cuadro 7.6, se puede calcular la cantidad mínima de agua necesaria para lavar el aceite de las sustancias afines a este líquido de lavado. Como menciona Armstrong (2012) generalmente a una concentración mayor o igual a 10 g/l, es que se puede definir una sustancia como soluble, por lo que se utilizará este valor como la solubilidad de las sales de sodio ya que no se puede definir un valor específico.

Dividiendo la masa de cada residuo soluble en agua entre su solubilidad, se obtiene la cantidad de agua mínima para disolver este residuo y separarlo del aceite declorinado. El cálculo final del agua de lavado es de 7,93 litros. Como puede denotarse este es un valor muy pequeño en comparación con los 750 litros de aceite por tanda, por lo que no se podría trabajar la centrifuga con esta cantidad de agua de lavado.

Tomando el parámetro de diseño presente en el trabajo de Klasson (2000) se utilizará una relación aceite/agua de 10:1, de manera que se realice un lavado adecuado del producto pero se contamine la menor cantidad de agua que sea posible. Definiéndolo de esta manera se tiene que por cada tanda se deberán de tratar 75 litros de agua con los residuos que se definirán más adelante.

Como se menciona en la caracterización de residuos, un total de 1,724 kilogramos de aceite es atrapado en los residuos de la reacción por tanda, lo que equivale a 1,965 litros. Este puede separarse en el tanque de reposo posterior a la centrifugación, ya que este aceite formaría una capa delgada sobre el agua residual y podría recuperarse manual o mecánicamente. En caso de formarse una emulsión, existen filtros especializados para eliminar aceite del agua como los que fabrican en TIGG Corporations (2014), formados con zeolitas modificadas.

7.4.1.3. Fase pesada

Puede definirse como parte de la fase acuosa ya que es el agua de lavado la que logra la separación de estas sustancias, sin embargo se analizará como una mezcla independiente ya que por su densidad promedio, este lodo se separará casi de inmediato de la fase acuosa. Las sustancias que lo conforman son los residuos no saponificables (caracterizados en el análisis de proceso) y los asfaltos y alquitranes, los últimos encontrándose en muy pequeñas cantidades en comparación con los otros residuos.

7.4.2. Separación secundaria

Teniendo definidas las fases formadas durante la centrifugación, se procede a establecer los métodos y operaciones necesarias para separar los componentes de cada una de éstas. Para cada fase se establecerán los equipos, insumos y procesos recomendados para separar y/o tratar los residuos de manera que puedan disponerse de manera responsable.

7.4.2.1. Separación de fase aceitosa

La fase aceitosa constará del aceite procesado en los tanques de declorinación y el separado de la fase acuosa, además de los ésteres de ácidos grasos, cetonas y demás productos de la oxidación del aceite dieléctrico. La separación se realiza en el sistema de regeneración del aceite, en las torres de tierras Fuller. En la investigación de Shanshool, Al-Sammerrai, y Allavi (1990) se menciona que este tipo de adsorbentes son altamente utilizados en la remoción de productos de oxidación de los aceites de lubricación.

La comprobación del método se muestra en los manuales de Redragon S.A (2013) donde se define que un sistema de regeneración de aceite de transformador permite un número de acidez menor a 0,01 mg KOH/g aceite, y la estabilidad a la oxidación con acidez menor a 0,2 mg KOH/g aceite y porcentaje de lodos menor a 0,03%. Estos resultados se encuentran dentro de los parámetros permitidos de la Norma ASTM 3487, por lo que es un método adecuado para la purificación del aceite como producto final.

En caso de que se compruebe analíticamente que la regeneración del aceite no sea un método suficiente para eliminar los productos de oxidación, se puede utilizar un método alternativo de separación. El regente químico M.Sc. Ariel Alfaro, químico con años de experiencia en la Facultad de Química de la Universidad de Costa Rica, mencionó que la extracción mediante un disolvente no polar resultaría en la purificación del aceite. La selección del disolvente podría realizarse mediante pruebas de extracción en laboratorio, con disolventes comunes como acetona y éter de petróleo.

Para el caso de partículas de polvo cuyo tamaño las clasifique como coloidales, se espera que el sistema de regeneración con Tierras Fuller elimine este residuo, como el equipo de la Corporación Enervac (2004). Además de lo anterior elimina residuos tipo asfaltenos, por lo que cualquier concentración de asfaltos y alquitranes en la fase aceitosa no debería ser un problema de contaminación del producto regenerado final.

En caso de que se presente una concentración apreciable de materia no saponificable (definida en el análisis de proceso) Moreda, Pérez, y Cert (2004) definen que el método más utilizado para su separación es la extracción con éter de petróleo o éter etílico, siendo el primero el que ha demostrado una mejor eficiencia.

Las cetonas se clasifican como productos de la oxidación de los aceites, por lo que se espera que el sistema de regeneración de Tierras Fuller elimine este residuo, en especial por su similitud estructural con los ácidos carboxílicos. En caso contrario debería de analizarse una extracción con un solvente apropiado.

7.4.2.2. Separación de fase acuosa

La fase acuosa consta de las sustancias solubles en agua como el hidróxido de sodio, carbonato de sodio, jabones de sodio combinado con ácidos grasos, cloruro de sodio y demás contaminantes pertenecientes a otras fases que no hayan podido separarse. La mayoría de las sustancias serán tratadas químicamente en lugar de separarse por métodos físicos, debido a que resulta más sencillo y con menor costo asociado.

La única sustancia a separar son los jabones de sodio, los cuales se encuentran parcialmente disueltos en la matriz acuosa. En el trabajo de Syamal (2008) se muestra que en los procesos de saponificación se utiliza el cloruro de sodio para precipitar los jabones, ya que su efecto iónico disminuye su solubilidad en agua. Es por lo anterior, y el hecho de que la temperatura de estos productos disminuye de 88 °C a 25 °C, que se considera una separación completa de los jabones presentes en disolución luego de un tiempo estimado de reposo. El equipo necesario sería un recipiente donde se coloque el agua hasta que se formen las dos capas, para luego separar los jabones de sodio mecánica o manualmente.

7.4.2.3. Separación de fase pesada

Debido a que estos lodos se generan en muy pequeñas cantidades y en una mezcla heterogénea, la separación y revalorización de estas sustancias no es factible económicamente para la empresa a cargo del proceso de los aceites contaminados. En lugar de esto se tratará el residuo de manera que la mezcla común pueda ser enviada a un relleno sanitario nacional o que se le realice una disposición final adecuada.

7.5. Tratamientos y disposición final

Ya definidos los procesos de separación factibles para el sistema estudiado, se deben establecer los tratamientos que se requieran para eliminar la peligrosidad de los residuos que se muestran en el Cuadro 7.5. Como es común se tendrán varias opciones para el tratamiento de un residuo, por lo que se estudiarán las opciones y de ser necesario se diseñarán los equipos que se consideren necesarios para ejecutar los procesos escogidos.

7.5.1. Aceite dieléctrico

Este será el porcentaje atrapado ya sea en la fase acuosa o fase pesada luego de la centrifugación. Para el caso de la fase acuosa, el aceite se podrá filtrar con un equipo especial o bien se recogerá manualmente junto con un porcentaje de jabones de sodio, para luego ser dispuesto en un relleno sanitario. El aceite contenido dentro del tanque receptor de los sólidos acumulados será tratado en conjunto con las otras sustancias.

Se recomienda la recuperación del aceite en caso de que el equipo necesario sea de poco mantenimiento, ya que la cantidad recuperada sería muy pequeña en comparación con el producto principal de la centrifugación. En caso de que el aceite atrapado en la fase acuosa forme una emulsión y no pueda separarse por diferencia de densidades, se deberá instalar el sistema aunque agregue un costo importante al proceso, o bien estudiar una posible recuperación final junto con el cloruro de sodio siempre y cuando no afecte el sistema de evaporación de forma importante.

7.5.2. Ésteres de ácidos grasos

Como se mencionó anteriormente, estos compuestos no presentan una peligrosidad apreciable, por lo que pueden disponerse en un relleno sanitario protegido contra filtración de lixiviados. La mayoría de estos se concentrarán en la fase aceitosa por lo que serían tratados por el sistema de Tierras Fuller luego de la centrifugación.

En caso de que se mantengan en la fase acuosa, serán fácilmente eliminados por medio de una separación por gravedad y remoción manual o mecánica. En caso de que se acumulen en el tanque de sólidos de la centrífuga, se podrán eliminar junto con el resto de residuos ya tratados en un relleno sanitario, como se mencionó anteriormente.

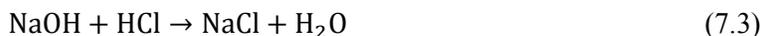
7.5.3. Hidróxido de sodio

Para 75 litros de agua de tratamiento y 187 gramos por tanda de aceite tratado, se tiene una concentración de 0,062 molar. El pH de las aguas residuales se puede obtener entonces con la ecuación 7.2, la cual se define con la concentración de iones hidróxido debido a la relación del pH con el pOH.

$$pH = 14 - (-\log[OH^-]) \quad (7.2)$$

El pH es entonces 12,8 y se necesita un tratamiento de corrección de pH. Debido a que la cantidad de hidróxido de sodio no es suficiente como para contemplar una recuperación [el costo asociado a su separación y purificación sería mayor que el potencial beneficio de 2800 colones por tanda, para un precio de venta de 15 000 por kilogramo (Ulate, 2014)] se utilizará la neutralización como método de tratamiento.

Como insumo se requiere de un ácido fuerte, donde los más comunes y accesibles son los ácidos clorhídrico y sulfúrico. Según Gupta y Mukherjee (2000) el segundo es más barato y con una mayor fuerza ácida, sin embargo genera sulfato de sodio, lo que podría generar malos olores (Mora, 2014). La utilización de ácido clorhídrico generaría cloruro de sodio como se muestra en la ecuación 7.3, compuesto que ya está presente en la matriz de mezcla por lo que no implicaría un tratamiento adicional.



Se cotizó mediante el ingeniero Adolfo Ulate el precio con el que el laboratorio de la Escuela de Ingeniería Química de la Universidad de Costa Rica obtiene el ácido clorhídrico (y el hidróxido de sodio como se mencionó anteriormente), obteniendo un valor de 2000 colones por litro. La concentración de la disolución de HCl es de 37% masa/masa, por lo que es la que se utilizará en el cálculo.

Como define Sanz (2013) la gravedad específica del ácido clorhídrico es de 1,18, por lo que puede definirse la concentración molar multiplicando este valor por la concentración masa/masa (0,37) y dividiendo por la masa molecular del ácido (36,46 g/mol), para definir una concentración 12 molar. Los 187 gramos de NaOH son un equivalente de 4,67 moles de la base, para una masa molecular de 40 g/mol. Como la relación es 1:1 con el ácido, se requiere la misma cantidad de moles de este para

realizar la neutralización, por lo que se consumirán aproximadamente 391 mililitros de disolución 12 molar por cada tanda de aceite descontaminado.

7.5.4. Sales de sodio

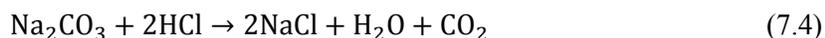
Como se mencionó anteriormente, el sodio saponificado se encontrará tanto en la fase acuosa como en la aceitosa, por lo que deben de realizarse dos tratamientos distintos. En la fase acuosa se asumió que todo el jabón se encuentra separado del agua por acción del enfriamiento y el cloruro de sodio, por lo que bastará con una separación manual o mecánica luego de un tiempo de reposo.

Se espera que el sistema de Tierras Fuller elimine los jabones de sodio de la matriz aceitosa, pero si esto no sucede, se puede utilizar un sistema de intercambio iónico. Según Nath (1996) se muestra un sistema de hidroxiapatita, el cuál logra atrapar los grupos carboxilo de las sales de sodio y liberar un ion hidróxido. Lo anterior sería una gran ventaja ya que el hidróxido de sodio podría eliminarse fácilmente del aceite por su baja solubilidad en este fluido.

7.5.5. Carbonato de sodio

Para un total de casi 28 gramos por lote declorinado, esta sustancia tendrá una concentración de 369 ppm en el agua residual. Se estudiaron dos procesos para el tratamiento de este compuesto, de manera que se tenga opciones y se tome la decisión que mejor beneficie a la empresa que desarrollará el proyecto.

Ebbing y Gammon (2009) muestran en su trabajo que el carbonato de sodio reacciona con el ácido clorhídrico según la ecuación 7.4, formando cloruro de sodio y dióxido de carbono gaseoso como productos de importancia.



La sal se trataría de la misma forma que la que se encuentra actualmente en solución, mientras que el dióxido de carbono podría mitigarse realizando uno de los procedimientos mencionados en el análisis de impacto ambiental.

Según Holma y Stone (2001) el segundo método implica la reacción del carbonato de sodio con cloruro de calcio. Los productos de reacción son el agua, cloruro de sodio y carbonato de calcio, siendo este último un sólido insoluble y no peligroso. El precipitado puede por ende recolectarse en el fondo del sistema de tratamiento, y el cloruro de sodio se sumaría a la concentración ya existente de esta sal.

El primer método tiene la ventaja de utilizar ácido clorhídrico, el cual ya se encuentra como insumo necesario para el tratamiento del NaOH. La desventaja es que es complicado corroborar que ya se ha eliminado o no el carbonato de sodio, ya que el residuo mayoritario es líquido.

El segundo método genera un residuo sólido (sin peligrosidad asociada) que precipita in situ, por lo que puede determinarse el inicio de la reacción y la cantidad exacta de carbonato de sodio presente en el agua residual. La principal desventaja es que se requiere comprar cloruro de calcio, cuyo precio es de 128 000 colones por kilogramo (Ulate, 2014). Para un relación 1:1 se tiene que se

requieren 29 gramos de cloruro de calcio para neutralizar el carbonato de sodio, lo que implicaría un costo asociado de 3700 colones por tanda.

Se utilizará el método de neutralización con ácido clorhídrico, debido a que presenta el menor costo y por la relación entre carbonato de sodio y soda cáustica. Como se requiere un PH entre 6 y 9, ya para un potencial de hidrógeno de 10 se habría de eliminar todo el carbonato de sodio (Alfaro, 2014). Cualquier residuo tendría una concentración demasiado baja para ser un riesgo importante dentro de un cuerpo de agua.

Los 27,7 gramos de carbonato de sodio representan un total de 0,26 moles de esta sal, por lo que se requerirá el doble de moles de ácido clorhídrico por la relación 1:2 mostrada en la reacción (7.4). Utilizando la misma disolución 12 mol/l, los 0,53 moles de ácido clorhídrico requeridos equivaldrán a 44 mililitros.

Tomando en cuenta los 391 mililitros del proceso de neutralización anterior, se tiene un costo aproximado de 870 colones por tanda de aceite declorinado en cuanto a reactivos. El ahorro neto de utilizar el método de neutralización es de aproximadamente 3630 colones, sin especificar el costo adicional de separación y disposición del carbonato de calcio producido.

7.5.6. Cloruro de sodio

El cloruro de sodio será el último material a tratar, luego de que todos los demás tratamientos hayan sido realizados en la fase acuosa. Este cloruro provendrá de la reacción principal de declorinación y como producto secundario de la neutralización del hidróxido de sodio y carbonato de sodio. Debido a su alta solubilidad en agua y estabilidad química, la separación por reacción química no es una opción viable para esta sustancia.

Como se muestra en la investigación de Ferraro, Cruz, Ferreira, Pintado, y Castro (2011) existen métodos de precipitación de cloruro de sodio mediante la extracción con etanol, ya que este genera una disminución importante de la polaridad del agua y en consecuencia una menor solubilidad de la sal en este líquido. El problema con este método es que solamente a condiciones críticas (0 °C) se alcanza el mayor porcentaje de precipitación (33%), por lo que se necesitarían equipos especiales o un tiempo elevado de proceso. Además de lo anterior el sistema alcanza un equilibrio no satisfactorio a menos que se utilicen sistemas por etapas con destilación del etanol, por lo que sería un procedimiento costoso y poco eficiente.

Tomando en cuenta lo anterior, se utilizará el método de evaporación de la solución salina como sistema de recuperación de la sal, con el beneficio extra de que no se tendrá un efluente líquido que deba disponerse al final de proceso. Se analizarán dos métodos: evaporación solar en lechos o tanquetas metálicas y evaporación por calentamiento dentro del reactor, de manera que se pueda establecer la mejor opción para el diseño.

7.5.7. Residuos sólidos

Constituidos principalmente por los sólidos metálicos, el polvo sedimentable y los lodos conteniendo los asfaltos y alquitranes. El residuo seguramente estará contaminado por cantidades

apreciables de aceite declorinado y agua de lavado, por lo que resultará en un lodo heterogéneo pero de una proporción muy pequeña en comparación con las otras fases.

Según Alfaro (2014) los residuos químicos con más de un 30% de humedad no son aceptados en un relleno sanitario, por lo que se recomienda realizar una filtración de los residuos con diatomita, para eliminar toda el agua atrapada y con esto obtener una pasta seca que puede disponerse en un relleno sanitario sin ningún problema, es especial por la cantidad tan pequeña de estas sustancias (3,5 gramos de asfaltos y alquitranes por cada tanda de 750 litros de aceite).

Existen otras opciones en caso de que no se acepte el residuo en un relleno sanitario nacional, como la acumulación del residuo seco para su posterior tratamiento en un horno cementero o procedimiento de incineración similar. Existe además un método económico denominado encapsulamiento, donde se mezclan los residuos con un material aglutinante como cemento o cenizas con materiales puzolánicos (Roy, Eaton, Cartledge, & Tittlebaum, 1992). Esta mezcla se seca y endurece atrapando los materiales peligrosos en su interior, para luego ser utilizada como aditivo en carreteras o bloques estructurales en construcción.

Se recomienda realizar alguno de los métodos de tratamiento mencionados anteriormente, ya que como mencionan Melber, Kielhorn, y Mangelsdorf (2004) los alquitranes generalmente contienen hidrocarburos aromáticos policíclicos en una concentración importante. Estas sustancias son consideradas como altamente carcinogénicas, por lo que su transporte y disposición a rellenos sanitarios implicaría un elevado riesgo ocupacional.

En caso de que se utilice el método de biorremediación para la generación de residuos sólidos contaminados con PCB's mencionado en el estudio de impacto ambiental, se podrían también tratar los residuos de asfaltos y alquitranes por este medio. Debido a las pequeñas cantidades de residuos pesados que se generan por tanda, estos podrían acumularse en un contenedor hasta que se inicie un proceso de biorremediación, para así aprovechar al máximo este recurso.

7.6. Diseño de equipos para los tratamientos

Tanto la fase aceitosa como la pesada pueden tratarse con el equipo ya existente dentro de los sistemas de declorinación y regeneración estudiados, sin embargo no existe un sistema de tratamiento de aguas establecido para la fase acuosa. A razón de los procedimientos ya establecidos en este análisis, se determinó que se debe diseñar un sistema de separación/neutralización y otro de recuperación de cloruro de sodio, de manera que se pueda disponer correctamente de los residuos y el agua de lavado contaminada.

Para los procesos de neutralización, es requerido un sistema que mezcle ambas fases de manera continua, al mismo tiempo que controla el valor de pH con mediciones periódicas. Para utilizar la menor cantidad de espacio posible se diseñará un reactor cilíndrico de metal con agitación, con un volumen de líquido de 75 litros y equipado con los sistemas de control necesarios.

Para el tratamiento de las sales de sodio y demás residuos presentes en el agua, se requiere de un tanque de sedimentación que permita una separación de fases adecuada. Para disminuir los gastos y el espacio utilizado se utilizará el mismo reactor como sistema de sedimentación, colocando una tapa removible (junto con el agitador mecánico) que permita un sistema de reposo para la mezcla

acuosa. No es necesaria un área transversal extensa para la flotación de las sales y demás residuos, ya que se encontrarán en pequeñas cantidades dentro del agua de lavado.

Cabe destacar que se tiene dos formas de separar el cloruro de sodio del agua, tanto por evaporación solar como con calentamiento eléctrico. Se analizarán ambos casos y se definirá el método que ofrezca una mejor solución para este proceso, tomando en cuenta el aspecto económico, seguridad laboral e impacto ambiental.

7.6.1. Reactor primario

En este se realizará la separación de los jabones de sodio y ácidos grasos del restante acuoso, para luego neutralizar el hidróxido de sodio y carbonato de sodio disueltos en el agua. Se diseñará un reactor por tandas de mezcla perfecta, con agitación mecánica y un sistema de control de pH.

Al ser un tanque que trabaja a presión atmosférica, se utilizará la parte elipsoidal superior como tapa en caso de que se deba revisar dentro del reactor. Se contará con entradas para el agua residual y el ácido clorhídrico, además de una salida para el agua tratada en caso de que se utilicen los lechos de evaporación solar. Se utilizará una turbina de seis aspas como agitador mecánico y un sello de labios, debido a que son poco costosos y adecuados para las condiciones del proceso en estudio (Rivera, 2002).

Para un volumen líquido requerido de 0,075 metros cúbicos, se define un tanque de dimensiones estándar (altura de líquido igual a diámetro) con fondo y tapa elipsoidales. Para un diámetro de 0,42 m y una altura de cada elipsoide de 0,05 m, se tiene un factor de seguridad de espacio vacío de 80% y una factor altura-diámetro de 1,12, condiciones suficientes para un proceso estable y seguro.

A razón de los factores de forma, se encuentran medidas complementarias como ancho de pantallas, el diámetro del agitador (D_a) y el ancho y alto de las aspas de la turbina. La longitud del eje del agitador es la diferencia entre la altura del líquido y la distancia entre el agitador y el fondo del tanque, siendo esta última equivalente a la longitud total del agitador. Las dimensiones del tanque y sus accesorios se resumen en el Cuadro 7.7.

Mediante los métodos establecidos por Rivera (2002), se calculó el diámetro del eje del agitador y la frecuencia natural, siendo estos 68 milímetros y 397 rpm respectivamente, para un eje de acero al carbono. Los cálculos no se presentarán en este capítulo ya que no se considera necesario, pero si se estableció que el eje es suficientemente rígido para soportar la rotación necesaria.

Cuadro 7.6. Dimensiones del tanque primarios y sus accesorios

Dimensión	Magnitud /(cm)
Diámetro	42
Altura total	52
Altura de líquido	47
Diámetro del agitador	14
Ancho de pantallas	3,5
Ancho de aspa	3,5
Altura de aspa	2,8
Longitud del eje del agitador	28

Para el tratamiento de neutralización, es necesario un sistema de agitación común, que se diseñará con el procedimiento establecido en (Rivera, 2010). Se utilizará una escala de agitación 3 recomendada para mezcla de líquidos miscibles con gravedades específicas menores a 0,6. Como se mostró anteriormente, la gravedad específica del ácido clorhídrico es 1,18, por lo que no se pueden utilizar las escalas de agitación menores (diferencia entre gravedades específicas menores a 0,1.).

Para esta escala de agitación, se tiene una velocidad del cuerpo del líquido de 0,091 m/s, para la cual se tiene la capacidad efectiva de bombeo (Q) de 0,0126 m³/s, multiplicando la velocidad por el área transversal del tanque. Utilizando la gráfica que se muestra en la Figura 7.1, puede calcularse el número de flujo (N_Q), tomando la relación entre diámetro de agitador y diámetro de tanque como 0,33 y asumiendo flujo turbulento (Re > 10 000).

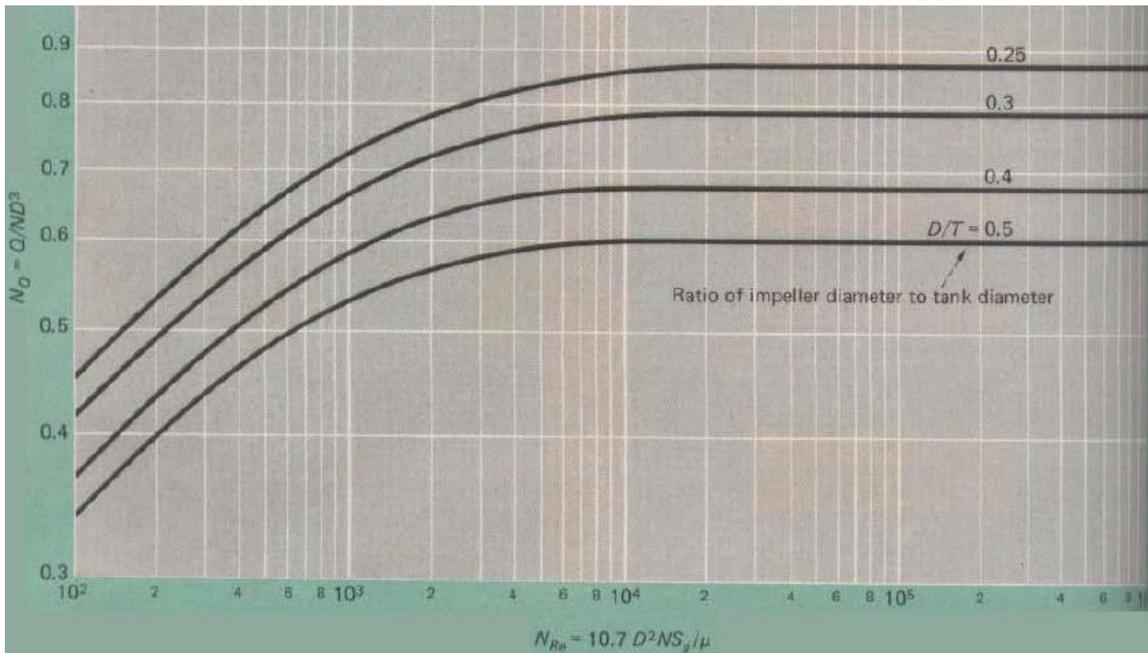


Figura 7.1 Relación entre los números de flujo y de Reynolds para tanques agitados (Rivera, 2010)

Teniendo el número de flujo, puede calcularse la velocidad de giro del impulsor (n), tal y como se muestra en la ecuación 7.5. Con este valor debe calcularse el número de Reynolds y verificar que en efecto sea mayor a 10 000. La ecuación 7.6 muestra el número de Reynolds para un sistema de tanque de agitación.

$$n = \frac{Q}{N_Q * D_a^3} \quad (7.5)$$

$$Re = \frac{n D_a^2 \rho}{\mu} \quad (7.6)$$

Donde ρ y μ son la densidad y viscosidad de mezcla respectivamente. El Reynolds para una densidad y viscosidad similares a las del agua es de aproximadamente 120 000, por lo que el diseño es satisfactorio. Teniendo una velocidad de giro de 6,13 s⁻¹, es posible calcular la potencia entregada

al líquido según la ecuación 7.7. Cabe destacar que esta no es la potencia requerida por el motor, ya que los cojinetes y la fricción total generan un gasto de potencia adicional.

$$P_w = \phi * n^3 * D_a^5 * \rho \quad (7.7)$$

Donde P es la potencia otorgada al líquido en Watts y ϕ el número de potencia. Para una turbina de seis aspas y un régimen turbulento se tiene un número de potencia igual a 6, con lo que puede calcularse una potencia de 74 W para el sistema de agitación. Rivera (2010) se menciona que las pérdidas del motor y motorreductor pueden alcanzar hasta un 40% de la potencia total del motor, por lo que la potencia final requerida del motor es de 185 W o 0,25 HP, la unidad equivalente más conocida. Se deberá utilizar un motor ya sea de $\frac{1}{4}$ o $\frac{1}{2}$ de HP, dependiendo de la disponibilidad de estos en el mercado.

En términos de la separación de los jabones de sodio, es complicado definir el tiempo necesario requerido para obtener la precipitación completa de las fases, por lo que se recomendaría tomar al menos una tanda y determinar este tiempo a base de observación de campo. Otro punto que debe analizarse es la opción de eliminar el tiempo de reposo y pasar el agua directamente a los lechos de evaporación (en caso de utilizar este método) de manera que se obtenga como producto final en conjunto con el cloruro de sodio.

La mejor opción solo puede definirse mediante experimentación con las primeras tandas de agua de lavado o bien pruebas de laboratorio, ya que es posible que el jabón afecta la evaporación y/o secado de la sal, dificultando su disposición final. Se recomienda establecer tanto el tiempo de reposo promedio necesario y la variación del sistema de evaporación con presencia de jabones de sodio, para así establecer la conjunción de métodos que ofrezca la mejor opción en cuanto a costos asociados y eficiencia del sistema.

Se analizó la opción de evaporar toda la tanda mediante calentamiento eléctrico, sin embargo la opción se descartó por el costo asociado de esos sistemas, en especial si se desea realizar el proceso varios días a la semana. La otra opción a contemplar es la evaporación mediante combustión de un gas, para lo cual se utilizaría el GLP, por ser el más común y de menor costo.

Se utilizaría el mismo tanque de reacción ya diseñado, solo que se agregaría en el fondo (dentro de la zona elíptica inferior) un burbujeador circular para dispersar los gases de combustión, además de aislar las paredes para disminuir las pérdidas de energía. Se realizaría la combustión del GLP en un quemador simple, y se utilizaría una tubería con un soplador (de ser necesario) para transportar los gases de combustión al reactor.

El problema con la evaporación térmica es que no es apta para evaporar en su totalidad el agua residual, ya que los sistemas de agitación y burbujeo necesitan estar sumergidos por el líquido. El remanente deberá de tratarse con evaporación solar, aunque en proporciones mucho menores a las que se esperan si se tratara la totalidad del agua residual.

7.6.2. Lechos de evaporación de cloruro de sodio

Akridge (2007) muestra el método de evaporación solar, el cual es el método más utilizado para la obtención de cloruro de sodio a partir de agua de mar. Tiene la ventaja de que la energía utilizada

no implica ningún costo adicional, y la desventaja de que la eficiencia depende directamente de las condiciones del tiempo en la zona de proceso. Se estudiará la evaporación de los 75 litros de agua residual, para determinar si se puede utilizar como método único de tratamiento.

Generalmente se utilizan tanquetas o lagunas artificiales con la solución salina, generalmente de baja profundidad para un mayor aprovechamiento de la radiación solar y disminución del tiempo de proceso. El método es generalmente utilizado en zonas costeras pero también ha sido utilizado en lugares de mayor altura, en especial para soluciones de gran concentración, ya que eso disminuye el tiempo total de evaporación.

La tasa de evaporación se define mediante la ecuación de Penman, a razón las condiciones atmosféricas y propiedades de la solución como se muestra en la ecuación 7.8. Se utilizará este método y las ecuaciones definidas en esta investigación para definir el área de lecho necesaria para evaporar el agua residual en un día de operación.

$$\lambda * E = \left(\frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \right) * R_{neta} + \left(\frac{\gamma}{\Delta + \gamma} \right) * f(u) * (e_s - e) \quad (7.8)$$

Donde E es la tasa de evaporación en mm/día, λ el calor latente de evaporación del agua, Δ el gradiente de la curva presión-temperatura, γ es la constante psicométrica, R_{neta} la radiación solar neta, $f(u)$ una función de la velocidad del viento y e_s y e las presiones de vapor de saturación y ambiental respectivamente. Cabe destacar que esta versión de la función de Penman ha sido modificada para determinar la evaporación en una disolución salina.

Cabe destacar que la temperatura y demás condiciones atmosféricas se definen como el promedio aritmético del valor más alto y más bajo del día que se realiza el análisis, de manera que se tenga un valor representativo para el diseño. Se solicitaron las condiciones del clima necesarias para el desarrollo de este diseño al Instituto Meteorológico Nacional, las cuales son un promedio del período de Enero a Octubre del 2014 y se muestran en el Cuadro 7.8.

La razón por la que se utilizan valores promedio casi anuales, es que el diseño tome en cuenta cualquier época del año y sus variaciones respectivas, ya que el proceso se espera realizar durante todo el año, siempre y cuando exista una demanda contante en el mercado laboral.

Cuadro 7.7. Condiciones climatológicas de la zona de Cartago de Enero a Octubre del 2014

Condición climatológica	Valor
Temperatura máxima /(°C)	25,07
Temperatura mínima /(°C)	7,93
Humedad relativa / (%)	59%
Velocidad del aire /(m/s)	5,73
Radiación total /(MJ/m ² día)	16,58
Altitud /(m)	1370
Coordenadas geográficas /(°)	Latitud 09°51' Longitud 83°54'

Se debe entonces calcular todos los términos de la ecuación 7.8 según las condiciones promedio que se muestran en el Cuadro 7.8. El calor latente depende de la temperatura y puede obtenerse mediante la ecuación 7.9, para un valor de 2,46 a 16,5 °C.

$$\lambda (MJ/kg) = 2,501 - 0,002361 * T \quad (7.9)$$

Para el cálculo de la presión de vapor de saturación, es importante tomar en cuenta la disminución de esta debido al decrecimiento del potencial químico ocasionado por la sal. Para tomar en cuenta esto se agrega el coeficiente de actividad del agua en la ecuación básica tal y como se muestra en la ecuación 7.10 definida a razón de la temperatura ambiente.

$$e_s(kPa) = 0,6108 * a_w * e^{\frac{17,27*T}{237,3+T}} \quad (7.10)$$

El coeficiente de actividad es función de la concentración de sales disueltas en el agua, y se puede aproximar mediante la ecuación 7.11, definida empíricamente y a razón de la concentración de cloruro de sodio en moles por litro. Para un valor de coeficiente de 0,989 se tiene una presión de saturación de 1,86 kPa.

$$a_w = -0,0011 * C_n^2 - 0,0319 * C_n + 1 \quad (7.11)$$

Debido a que la presión de vapor es una función de la temperatura, el gradiente de esta función se puede calcular como se muestra en la ecuación 7.12. Como resultado se tiene un gradiente de 0,118 kPa/°C.

$$\Delta(kPa/°C) = \frac{4098 * e_s}{(237,3+T)^2} \quad (7.12)$$

La constante psicrométrica γ se define en la ecuación 7.13 a razón de la presión atmosférica, simplificando la definición general debido a que las otras variables como la capacidad calorífica del aire cambian muy poco y son aproximados por la constante dentro de la ecuación.

$$\gamma = 0,000655 * P \quad (7.13)$$

Para una presión atmosférica desconocida, esta puede aproximarse a razón de la altura del sitio, mediante la ecuación 7.14. Para una presión atmosférica de 85,4 kPa se obtiene una γ de 0,056 kPa/°C.

$$P(kPa) = 101,3 * \left(\frac{293-0,0065*z}{293}\right)^{5,26} \quad (7.14)$$

Al igual que las otras condiciones atmosféricas, la presión de vapor ambiental se puede calcular como el promedio aritmético del valor máximo y mínimo del día, pudiéndose calcular cada uno de estos según la ecuación 7.15 definida a razón de la humedad relativa y la presión de saturación. Se tiene al final un valor de 1,096 kPa para la presión de vapor de diseño.

$$e = \frac{H_x * e_s}{100} \quad (7.15)$$

Donde la humedad relativa (H_x) se define como un porcentaje regular (%). La función de velocidad del viento depende de coeficientes empíricos de la resistencia atmosférica encontrada en la difusión del vapor de agua desde una superficie líquida. Para una superficie líquida abierta la función de velocidad del aire se calcula con la ecuación 7.16, donde la velocidad del viento (U) está dada en metros por segundo y se mide a 2 metros del suelo.

$$f(u) = 6,43(1 + 0,536 * U) \quad (7.16)$$

Para una velocidad del viento de 5,73 m/s, se tiene una función de 26,19 m/s. La velocidad del viento es un factor que varía demasiado en un año como para tener un valor promedio establecido, por lo que se utilizó un promedio para un día laboral (8 a.m a 4 p.m) tomando los valores de velocidad de viento cada hora el 10 de Diciembre del 2014. Los valores fueron tomados del sensor colocado en El Tecnológico de Costa Rica, propiedad del Instituto Meteorológico Nacional y que se muestran en tiempo real en (Instituto Meteorológico Nacional, 2014).

El único valor restante es la radiación solar neta para la zona donde se encuentra el proceso en estudio. En el cuadro 7.8 se muestra el valor de radiación total (R_T), sin embargo para el cálculo de la evaporación debe utilizarse el valor de radiación neta, aplicando correcciones por duración de luz relativa, albedo y radiación reflejada. La primera se define según la ecuación 7.17 para obtener el factor R_{sd} , la radiación solar diaria ($\text{MJ}/\text{m}^2\text{día}$).

$$R_{sd} = \left(0,25 - 0,5 * \frac{N_{real}}{N_{max}}\right) * R_T \quad (7.17)$$

Donde N_{real} es la cantidad real de horas sol y N_{max} la cantidad máxima posible de luz solar. En el trabajo de Heinrich, Pacheco, Solera, y Alfaro (2013) se muestran las horas de sol reales para el año 2013, por lo que asumiendo que no hay un cambio importante para el año 2014 se tiene el promedio para el período Enero-Octubre de 4,5 horas de sol diarias. La cantidad máxima de horas de sol se puede calcular a razón de la ecuación 7.18 a razón de varias propiedades del ciclo solar.

$$N_{max} = \frac{24}{\pi} * \omega \quad (7.18)$$

Donde ω es el ángulo horario del atardecer. Este ángulo se define mediante la ecuación 7.19 como se muestra a continuación:

$$\omega = \arccos[-\tan(\varphi) * \tan(\delta)] \quad (7.19)$$

Donde φ es la latitud del lugar de estudio y δ es la declinación del sol, ambas en radianes. La latitud se muestra en el Cuadro 7.8 en grados, cuyo valor en radianes es 0,1719. La declinación del sol se calcula con la ecuación 7.20 y depende del día de año (J) en que se realiza el cálculo. Debido a que los demás valores son un promedio de 10 meses, es complicado definir un valor promedio de la declinación del sol por lo que se tomará el valor más conservador definido para el 31 de Octubre del 2014 (304).

$$\delta = 0,409 * \sin\left(\frac{2*\pi*J}{365} - 1,39\right) \quad (7.20)$$

Por lo que para un valor de $-0,264$ para la inclinación del sol, se obtiene un ángulo ω de $1,524$ y un total de $11,6$ horas máximas permisibles de luz solar. Con esto puede entonces calcularse la radiación solar diaria para el 31 de Octubre del 2014, siendo de $7,35 \text{ MJ/m}^2\text{día}$.

La segunda corrección debe realizarse por efectos de albedo (α), o bien la radiación que es reflejada de vuelta al ambiente por la superficie de trabajo (tanquetas metálicas, cloruro de sodio cristalizado). Se puede entonces calcular la radiación solar efectiva (R_{ef}) mediante la ecuación 7.21 para el sistema de evaporación de disolución salina, tomando un valor conservador de $0,3$ para el albedo (reflexión solar por formación de cristales).

$$R_{ef} = (1 - \alpha) * R_{sd} \quad (7.22)$$

Según el valor calculado de radiación solar diaria, se obtiene $5,144 \text{ MJ/m}^2\text{día}$ como la magnitud de la radiación solar neta. Para realizar la última corrección, se utiliza la ecuación 7.23 para definir la radiación de onda larga (R_{nl}), asociada a la reflexión del suelo la radiación que es atrapada por nubes, vapor de agua, polvo y dióxido de carbono.

$$R_{nl} = \sigma * \left(\frac{T_{max}^4 - T_{min}^4}{2} \right) * (0,34 - 0,14 * \sqrt{e}) * (1,35 * \frac{R_{sd}}{0,75 * R_T} - 0,35) \quad (7.23)$$

Donde σ es la constante de Stefan-Boltzmann ($4,903 \times 10^{-9} \text{ MJ/K}^4\text{m}^2\text{día}$). Con los valores de radiación anteriores y las temperaturas del Cuadro 7.8 se obtiene que la radiación de onda larga para este diseño es de $8,473 \times 10^{-5} \text{ MJ/m}^2\text{día}$. La radiación solar que se utiliza en la ecuación 7.8 es la diferencia entre R_{ef} y R_{nl} , lo cual da como resultado $5,144 \text{ MJ/m}^2\text{día}$. Tomando todos los valores calculados anteriormente es posible calcular la evaporación solar del agua residual, siendo esta de $4,02$ milímetros por día.

Teniendo un volumen de agua a tratar de 75 litros, se puede calcular el área necesaria para evaporar la totalidad del agua en un solo día de proceso, tomando la evaporación como la altura de la tanqueta o laguna a utilizar. Es entonces necesaria un área de $18,7$ metros cuadrados para evaporar toda el agua residual en un día, por lo que puede tomarse un valor de 20 metros cuadrados como factor de seguridad del diseño.

Se recomienda la construcción de unas tanquetas metálicas con una altura de un centímetro de manera que se eviten derrames de la solución salina, y que su conducción térmica permita un aumento en la eficiencia de evaporación.

En el sitio donde se realizará el proceso, no existe un espacio libre de estas dimensiones para colocar las tanquetas en el suelo, por lo que se recomienda realizar esta última fase del proceso en otro sitio que tenga disponible la empresa, lo que implicaría un costo de transporte y espacio que no se tenía contemplado con el proceso principal. La otra opción sería un sistema colocado sobre el techo de la empresa, pero los procesos de recolección de la sal podrían ser riesgosos para el personal y se requerirían de sistemas de bombeo para el agua residual.

El sistema constaría de una estructura metálica que funcionara de soporte para la tanqueta de evaporación, y que el agua residual se transportara mediante una bomba de elevación a centro de esta. Se requeriría de un operario para subir y recolectar el residuo en algún tipo de recipiente,

siempre utilizando un arnés de seguridad mientras realiza esta labor. Un sistema automático de recolección y almacenado de la sal podría ser una solución al problema de riesgo, pero los costos asociados podrían ser muy elevados.

7.6.3. Sistema combinado de evaporación

Debido a la gran cantidad de área requerida para realizar la evaporación del agua residual solamente con radiación solar, se concluyó que un método combinado sería la mejor opción para realizar este proceso de tratamiento. Se utilizará la evaporación térmica dentro del reactor ya diseñado hasta que se obtenga una cantidad de líquido evaporado que no afecte el sistema de distribución de gas, y luego se tomará el remanente y se evaporará mediante radiación solar hasta obtener la sal como residuo.

La evaporación térmica debe realizarse en dos fases, ya que la agitación no puede continuar cuando el nivel del agua sea el mismo que el del agitador mecánico. Según las dimensiones establecidas en el Cuadro 7.7, el agitador se encuentra a 28 centímetros del nivel inicial de agua, por lo que se tomarán tres centímetros como factor de seguridad y se realizará la evaporación de 25 centímetros de agua con agitación mecánica (fase uno).

El calor necesario para esta etapa se divide en dos partes, el calentamiento del agua hasta el punto de ebullición y la energía necesaria para el cambio de fase (calor de evaporación). El primero puede calcularse con la ecuación 7.24 para transferencia de calor mediante contacto directo.

$$\dot{Q} = m * C_p * \Delta T \quad (7.24)$$

Donde C_p es la capacidad calorífica de la mezcla, con un valor para el agua de 4,1844 kJ/kg K a 40 °C, la temperatura media de calentamiento (Chacón, 2012). Debido a que la concentración de la sal aumenta el punto de ebullición de la mezcla, se calculó con el método mostrado por Ahmadzadeh, Pejman, Mahin Abdollahzadeh, Ahmadzadeh, y Nazariha (2011) tal efecto, pero se determinó que aún en la solución final concentrada el aumento era de un grado Celsius, por lo que no se espera que este fenómeno afecte significativamente el cálculo del calor necesario.

Tomando en cuenta todo lo anterior, y una masa de agua de aproximadamente 76,5 kilogramos, se obtiene un valor de calor sensible de 2600 KJ. El calor de evaporación se obtiene multiplicando la masa de agua a evaporar (34,6 kg) por su respectiva entalpía de vaporización, que como se calculó anteriormente es de 2262,5 KJ. Para un calor latente de 83646,8 KJ se tiene un calor total para la fase uno de 109 553,6 KJ.

Utilizando un precio de 210,33 Colones por litro de GLP para el 15 de Enero del 2014 (Zeta Gas, 2015), y un valor de poder calorífico inferior (energía mínima aprovechable del gas como combustible) de 46 607 KJ (Argonne National Laboratory, 2010), se obtiene una masa requerida de gas para la primera evaporación de 2,94 kilogramos y un costo asociado de ₡ 1095. Lo anterior utilizando una densidad promedio para el LPG de 564,6 kg/m³ (Carson & Mumford, 2002) y asumiendo un 20% de pérdidas energéticas por convección al ambiente.

Debido a que los gases de combustión tienen una temperatura bastante elevada en comparación con la del agua, y que la capacidad calorífica de este líquido es alta, se considerará que la transferencia

de calor no experimentará una resistencia de interface apreciable, por lo que no es necesario realizar un cálculo de este tipo. Los costos asociados al proceso de combustión permiten este tipo de simplificaciones, además de las dimensiones del proceso de evaporación.

Cabe destacar que la utilización de un sistema con dispersión de gases afecta la potencia necesaria para lograr el nivel de agitación deseado, pero este efecto siempre genera una disminución. Es por lo anterior que se define el motor ya establecido como satisfactorio para el proceso de evaporación, e inclusive podrá trabajar a menor potencia eléctrica que en el proceso de neutralización.

Luego de la primera evaporación, se recomienda realizar una segunda fase sin agitación mecánica, y utilizar el mismo burbujeo de los gases de combustión para promover la transferencia de calor entre las dos fases. El método no será tan eficiente como la fase uno, pero se espera evaporar el agua hasta la base de la zona cilíndrica, y que solo el volumen elíptico inferior permanezca con agua residual, manteniendo sumergido el sistema de burbujeo.

El agua con cloruro de sodio ya se encuentra en su temperatura de ebullición en este punto, por lo que se requiere de energía solamente para provocar el cambio de fase. Se calcula el calor latente de la misma forma que la parte anterior, solo que la masa de agua a evaporar será de 23,5 kg. Utilizando la misma entalpía de vaporización, se obtienen un calor necesario de 56 880,8 KJ y un costo asociado de 570 colones (fase dos). El costo puede ser mayor debido a que la agitación puede resultar insuficiente, pero como el costo es bajo no se espera un aumento importante.

Finalmente se tendrá un residuo de 18,44 kg de disolución 1,3 molar, el cual puede ser evaporado mediante radiación solar. Del diseño anterior se cambia la concentración de la sal y el volumen requerido, para obtener un área de evaporación necesaria de 4,63 m². Se puede entonces diseñar una tanqueta de 2,5x2, 5 metros, la cual podría colocarse en un espacio definido en el área externa de la empresa o contemplar su colocación en el techo, tal y como se analizó anteriormente.

CAPÍTULO VIII: ANÁLISIS DE IMPACTO AMBIENTAL

8.1. Introducción

El análisis de impacto ambiental puede ser complejo dependiendo de las características del proceso y el lugar donde se realice. Uno de las primeras tareas a enfrentarse es la limitación del estudio, ya que además de requerir mucho esfuerzo e insumos, el tiempo necesario para realizarlo puede convertir el proyecto en algo rentable o no. Lo más importante es determinar la evaluación necesaria para el proyecto en cuestión y no incurrir en gastos innecesarios, mientras que se siguen los reglamentos nacionales concordantes con la materia de impacto ambiental potencial de una empresa en el país.

La aplicación del formulario D1 de SETENA permite obtener una noción general de los principales impactos ambientales que genera el proceso en estudio a razón de aspectos y factores ambientales definidos. El siguiente estudio se realiza con el objetivo de ahondar en el proceso y los equipos a utilizar, de manera que se definan y analicen los aspectos ambientales asociados y se tenga una idea más completa del impacto ambiental total ocasionado. Finalmente se formularán acciones de mitigación a modo de recomendación para la empresa ejecutora del proceso, para minimizar el impacto ambiental con recursos limitados y de la forma más eficiente posible a través del método de análisis que mejor se acople al proceso estudiado.

8.2. Método de análisis de impacto ambiental

Existen varios métodos para análisis y determinación del impacto ambiental generado por un proyecto o actividad en específico, cada uno a razón de la cantidad de información con la que se cuenta y el tipo de aspectos ambientales que se definen en el análisis. El proyecto en estudio no cuenta con información específica de proceso debido a que es un proceso nuevo y además existe una variabilidad importante en las propiedades y cantidades de las sustancias y materiales a tratar; por consiguiente se utilizará el método de evaluación convencional de impacto ambiental que muestra García (2007). Antes que nada es importante definir tres conceptos básicos de manera que no se confundan o traslapen, puesto que es un método cualitativo de análisis.

Acción: Es el fenómeno, proceso u operación unitaria que genera un efecto apreciable sobre un entorno definido. Es la causa que origina el efecto sobre el entorno, y también se denomina aspecto ambiental. Como ejemplos se tiene una reacción exotérmica dentro de un reactor, la generación de gases de efecto invernadero o inclusive una separación de fases dentro de una centrífuga.

Efecto: Es la consecuencia de la acción, la situación que ejerce un cambio apreciable en el equilibrio del entorno afectado. Es lo que principalmente define el impacto ambiental y por ende es el aspecto que debe quedar mejor definido. Contaminación aérea por gases de efecto de efecto invernadero e ingreso de compuestos orgánicos persistentes a un sistema acuático son ejemplos de un efecto de tipo ambiental.

Factor ambiental: Se define como una parte definida del entorno o ambiente donde se desarrolla el efecto generado por una acción. Es la magnitud del efecto lo que define la proporción del factor ambiental con respecto al entorno como un todo, e inclusive afectar más de un tipo de factor al mismo tiempo. Como ejemplos se tiene el aire, el agua y el suelo.

El método convencional se basa en una relación entre los factores ambientales y acciones por medio de una matriz denominada como Matriz de importancia del proyecto. Sin embargo cada acción se relaciona a un efecto que a su vez se relaciona con el factor, por lo que este fenómeno vinculante debe calificarse con la mayor precisión posible.

Con la combinación de contribuciones se define la importancia del impacto ambiental con la ecuación 8.1 mostrada a continuación, a razón de once términos que califican cualitativamente el aspecto ambiental según sus propiedades constitutivas.

$$I_{ij} = NA_{ij}(3IN_{ij} + 2EX_{ij} + PE_{ij} + RV_{ij} + MO_{ij} + AC_{ij} + PR_{ij} + MC_{ij}) \quad (8.1)$$

Estos términos se definen en el cuadro 8.1, donde además se denotan los valores numéricos que deben asignarse a cada variable según la valoración cualitativa que le corresponde. La importancia (I) se clasifica entonces según los siguientes intervalos a razón del valor final obtenido.

- Irrelevante o Compatible: $0 \leq I < 25$
- Moderado: $25 \leq I < 50$
- Severo: $50 \leq I < 75$
- Crítico: $75 \leq I$

Cuadro 8.1. Términos que califican la importancia de un efecto y su caracterización

NA: Naturaleza		AC: Acumulación		PE: Persistencia	
(+) Beneficioso	+1	(S) Simple	1	(F) Fugaz	1
				(T) Temporal	2
(-) Perjudicial	-1	(A) Acumulativo	4	(P) Permanente	4
RV: Reversibilidad		PR: Periodicidad		MO: Momento	
(C) Corto plazo	1	(I) Irregular o aperiódico	1	(L) Largo plazo	1
				(M) Medio plazo	2
(M) Medio plazo	2	(P) Periódico	2	(I) Inmediato	4
(I) Irreversible	4	(C) Continuo	4	(C) Crítico ⁽²⁾	+4
MC: Recuperabilidad		IN: Intensidad		Ex: Extensión	
(IN) De inmediato	1	(B) Baja	1	(Pu) Puntual	1
(MP) Medio Plazo	2	(M) Media	2	(Pa) Parcial	2
(M) Mitigable	4	(A) Alta	4	(E) Extenso	4
(I) Irrecuperable	8	(MA) Muy Alta	8	(T) Total	8
		(T) Total	12	(C) Crítico ⁽¹⁾	+4

(1) Si el área cubre un lugar crítico (especialmente importante) la valoración será cuatro unidades superior

(2) Si el impacto se presenta en un momento (crítico) la valoración será cuatro unidades superior

Cada término define cualitativamente un efecto, por lo que estos primeros deben caracterizarse lo mejor posible para evitar errores de subjetividad. A continuación se presenta una pequeña definición para cada término y aspectos cuantitativos que permiten discernir y nivelar de una mejor manera cada término, para así poder categorizarlo con la mayor precisión posible.

- (NA) Naturaleza: Define si el efecto tiene un carácter beneficioso o perjudicial en el ambiente definido.
- (IN) Intensidad: expresa el grado de incidencia de la acción en estudio sobre el factor determinado, variando desde una afección mínima hasta la destrucción total del factor.
- (EX) Extensión: Representa el área que se piensa va a ser afectada en relación con el entorno del proyecto, generalmente expresada en términos porcentuales. Si el área está muy localizada se denomina puntual, mientras que si esta corresponde a la todo el entorno, será total.
- (RV) Reversibilidad: determina la posibilidad de reconstrucción del factor afectado mediante métodos no antropogénicos, y en caso de ser posible, el intervalo de tiempo necesario. En este caso el corto plazo se considera menos de un año, el medio plazo entre uno y diez años y si se necesita más tiempo se considera irreversible.
- (MC) Recuperabilidad: define la posibilidad de reconstruir el factor afectado mediante intervención humana, o bien puede mitigarse de manera que se minimicen las consecuencias de la manifestación.
- (PE) Persistencia: define el tiempo que se espera que permanezca el efecto desde que inicia. Se define también en unidades de tiempo (años) y se considera fugaz si permanece menos de un año, temporal si lo hace de uno a diez años y permanente si supera la década. Cabe destacar que si un efecto es fugaz o temporal este siempre será reversible o recuperable, sin embargo los permanentes pueden ser reversibles o irreversibles, recuperables o irrecuperables.
- (AC) Acumulación: En caso de que la acción permanezca y esto produzca un efecto creciente en el tiempo, se considera que dicho efecto es acumulativo.
- (PR) Periodicidad: Se refiere a la regularidad con la que se manifiesta un efecto, y si existe un intervalo de tiempo definido entre cada aparición. Puede ser periódico, continuo o irregular.
- (MO) Momento: Referido al tiempo que transcurre entre el inicio de la acción y el inicio del efecto generado por esta. Generalmente se define en unidades de tiempo, considerándose corto plazo a un intervalo de menos de un año, medio plazo de uno a cinco años y el largo plazo a más de cinco años.

Cabe destacar que el método original implica dos términos denominados Sinergia (relación entre dos efectos en los que su manifestación conjunta es superior a la suma de las consecuencias si estas se obtendrían si cada uno de ellos actuase por separado) y la Relación Causa-Efecto (Directo si la acción misma genera el efecto, indirecto si es otro efecto el que lo origina), sin embargo se decidió no tomarlas en cuenta. Lo anterior se fundamenta primero en que no se cuenta con información específica del proceso, por lo que no se puede definir con claridad la posible sinergia entre dos efectos, y segundo porque la Relación Causa-Efecto no ofrece conclusiones importantes para el análisis en cuestión y su alcance como se tiene definido.

Luego de definir la importancia del efecto a razón de cada término, se define la magnitud de cada factor con un Índice de Unidades de Importancia; sin embargo este procedimiento va dirigido hacia el análisis de un proyecto como un todo. El análisis actual (con la información disponible y el objetivo definido) se fundamenta en el establecimiento de los aspectos ambientales (acciones) y calificarlas según su efecto en el entorno, de manera que se puedan establecer medidas de mitigación apropiadas. Es por lo anterior que se utilizará la Importancia del efecto como método de decisión según lo definido en Cuadro 8.2, para definir las acciones a seguir según el tipo de efecto causado por el aspecto ambiental.

Cuadro 8.2 Caracterización de la importancia del efecto y su impacto ambiental

Importancia del efecto	Decisión
Irrelevante o compatible	Impacto ambiental leve o nulo. No es necesario formular medidas de mitigación ya que el efecto no afectará el entorno de manera importante.
Moderado	Impacto ambiental bajo pero apreciable. Las acciones de mitigación no son necesarias pero deben definirse acciones correctivas o compensativas, siempre y cuando no signifiquen un costo elevado a la Empresa.
Severo	Impacto ambiental alto e importante. Deben formularse las medidas de mitigación necesarias para reducir el efecto neto de la acción sobre el factor hasta condiciones tolerables.
Crítico	Impacto ambiental inaceptable. Es necesario replantear el proceso u operación unitaria en estudio de manera que se reduzca el efecto hasta condición mitigable o mejor.

Es importante recalcar que debido a que se eliminaron dos términos de la ecuación 8.1, la suma total de contribuciones no va a ser de 100, sino que disminuiría a 88. Es por lo anterior que los intervalos de caracterización para la Importancia (I) del efecto se redefinieron para este nuevo valor máximo según criterio propio y de la siguiente forma:

- Irrelevante o Compatible: $0 \leq I < 22$
- Moderado: $23 \leq I < 44$
- Severo: $45 \leq I < 66$
- Crítico: $67 \leq I$

8.3. Aspectos ambientales

Se define aspecto ambiental como una acción, operación o proceso específico que genera un impacto en el ambiente, de manera que es la base sobre la cual se realiza cualquier análisis de afectación ambiental. Puesto de otra manera, Carretero (2007) lo define como aquello que una actividad, producto o servicio genera (como emisiones, vertidos, ruido, entre otras) que puede tener incidencia sobre el medio ambiente, donde este último es el medio receptor de los aspectos

ambientales, incluyendo los seres vivos que habitan en el (tomando en cuenta el ser humano y sus interrelación con el medio que lo rodea).

A continuación se definirán los aspectos ambientales que se determinaron del proyecto en estudio, además de su análisis y caracterización de manera que se tenga una idea lo más completa posible del impacto ambiental latente en cada una de las actividades. Con la información obtenida se generarán acciones de mitigación de impacto ambiental a razón de los aspectos definidos con anterioridad, formulando recomendaciones para las zonas sensibles del proceso y con esto minimizar la afectación a medio ambiente determinado.

8.3.1. Etapa constructiva y de remodelación

Se tomará todo el proceso de construcción y reordenamiento de la empresa como un solo aspecto ambiental, debido a que no se realizan trabajos que generen impactos a gran escala cuando se analizan por separado, como movimiento de grandes cantidades de tierra o ruido elevado. En general se planea una adecuación permanente del edificio para el proceso de tratamiento del aceite contaminado, para lo que se necesitan las siguientes acciones:

- Acondicionamiento de una vieja bodega para utilizarla como cuarto de almacenamiento del reactivo de sodio, de manera que disminuya el riesgo asociado en caso de fuga. Se deben eliminar todos los materiales que se encuentran ahí actualmente, introducir el sistema de tuberías, la base del cilindro giratorio y condicionar la ventilación del lugar a razón de la ficha de seguridad del reactivo.
- Adecuación de los muelles de carga y descarga, además de la creación de un pasillo de conexión entre estos, en caso de que se genere la necesidad de transportar un contenedor de un lado de la línea de proceso al otro. Este procedimiento implica el chorreado de grandes cantidades de cemento, además de la construcción de un techo para el pasillo construido. Todo lo anterior implica la remoción de suelo y zonas verdes, generando un impacto ambiental apreciable dentro del terreno de la empresa.
- Acondicionamiento del edificio donde se colocarán los módulos de declorinación y regeneración del aceite, de manera que se tenga acceso a todos los servicios de energía eléctrica, gas nitrógeno, aire y agua de lavado. Debe de impermeabilizarse el piso con un material epóxico, instalar las tuberías de insumos, servicios y productos, eliminar estructuras metálicas y residuos del uso anterior que se le tenía al edificio y delimitación de las áreas de trabajo mediante la separación por paredes a construir.

Como afectación general se tiene la utilización de cantidades importantes de agua para la obra gris, movimiento moderado de tierra y suplantación de zonas verdes por aceras de cemento (aunque la modificación del uso de suelo es leve en comparación con el área total del proyecto), emisión de fuentes móviles en la maquinaria utilizada, generación de aguas residuales debido al proceso constructivo y en general los aspectos ambientales que comúnmente se presentan en una etapa constructiva regular. En la Figura 8.1 se presenta el análisis de impacto ambiental para este aspecto ambiental en específico, y la definición de su importancia.

Naturaleza	Persistencia	Momento	Importancia del Efecto
(-)	Fugaz	Inmediato	
Intensidad	Reversibilidad	Extensión	Moderado (-27)
Media	Irreversible	Puntual	
Acumulación	Recuperabilidad	Periodicidad	
Acumulativo	Mitigable	Periódico	

Figura 8.1. Análisis de impacto ambiental para el proceso constructivo

Es de naturaleza negativa debido a que de esa manera afecta el ambiente, agregando volátiles y contaminantes aéreos por el uso de maquinaria y afectando el suelo con su modificación e ingreso de contaminantes derivados del cemento. Es además de intensidad media ya que los efectos al ambiente son importantes pero no destructivos y de extensión puntual por su rango de acción regionalizado al terreno propiedad de la empresa. Se denomina el momento como inmediato, ya que los efectos al ambiente se notarían rápidamente después de iniciado el proceso.

El efecto es fugaz debido a que disminuye apreciablemente cuando se detiene el proceso constructivo, con la única excepción de la modificación de uso de suelo debido al chorreado de concreto para las remodelaciones. El punto anterior le confiere la característica de irreversible, pues es muy complicado que por medios naturales se pueda recuperar el ambiente que se tenía antes de iniciar la obra. El efecto es mitigable, por ejemplo mediante compensación con vegetación decorativa y lineamientos rigurosos de eficiencia en el equipo constructivo.

Las consecuencias de la acción se consideran periódicas debido a que suceden durante ciclos establecidos de trabajo, y cuenta con afectaciones acumulativas mediante avanza la obra, ya que cada situación de impacto se agrava a medida que se aumentan los días necesarios para finalizar el proceso constructivo. Por definirse como efecto de importancia moderada, deben generarse acciones de compensación o de control primario, de manera que se puedan minimizar los efectos negativos a la zona circundante.

8.3.1.1. Medidas de correctivas y/o compensativas

En general es complicado determinar medidas para minimizar el impacto de un proceso constructivo, debido a que no es económicamente viable sustituir la maquinaria utilizada por trabajo completamente manual. Los procesos a realizar están establecidos desde hace años, por lo que las acciones a tomar son el seguimiento minucioso de los controles y mantenimiento de la maquinaria a utilizar, trabajar estrictamente bajo el horario establecido por la zona franca y organizar el trabajo lo mejor posible para minimizar la generación de ruido y emisiones contaminantes.

Para la parte de cambio de uso de suelo, al ser un área afectada relativamente pequeña, es posible disminuir el efecto al conseguir plantas decorativas para el área de oficina, de manera que se mejore el ambiente laboral al mismo tiempo que se reemplaza la vegetación eliminada. El mismo procedimiento puede expandirse para los alrededores de la empresa en paredes y lugares donde no aumenten un riesgo de seguridad ocupacional por limitación de tránsito laboral.

8.3.2. Generación de residuos sólidos en el tratamiento de los transformadores

Luego del drenado del aceite contaminado, el transformador debe inspeccionarse de manera rápida para determinar si es posible reutilizarlo. En específico debe revisarse que el papel aislante no esté rasgado o deteriorado, que el núcleo metálico no esté corroído o resquebrajado y que la carcasa no tenga ningún problema por dentro del equipo. Debido a que muchos de los transformadores habían estado varios años funcionando en la red eléctrica, se tiene contemplado que varios no puedan reutilizarse parcial o completamente, por lo que la generación de residuos contaminados es un hecho que debe tomarse en cuenta en este análisis, tal y como se muestra en la Figura 8.2.

Naturaleza	Persistencia	Momento	Importancia del Efecto
(-)	Permanente	Inmediato	
Intensidad	Reversibilidad	Extensión	Severo (-49)
Alta	Irreversible	Total	
Acumulación	Recuperabilidad	Periodicidad	
Acumulativo	Mitigable	Irregular	

Figura 8.2. Análisis de impacto ambiental para la generación de residuos sólidos contaminados

Es de naturaleza negativa debido a su afectación primordialmente en la fauna y sus características bioacumulativas. Los bifenilos policlorados tienen consecuencias tanto a corto como a largo plazo en los organismos con los que tienen contacto, por lo que tiene un efecto de intensidad alta. Tienen propiedades acumulativas debido a sus características antes mencionadas y su baja tasa de degradabilidad. Se determina de periodicidad irregular ya que la generación de estos residuos depende intrínsecamente del estado físico interno de cada transformador, lo cual no puede averiguarse hasta que se haya drenado el aceite y abierto este.

La extensión del efecto es total ya que estos contaminantes pueden ser transportados grandes distancias por efecto de acarreo en aire u agua, o bien sus propiedades de permeancia en suelo. Lo anterior aunado a sus características de persistencia, permiten que el radio de afectación por parte de estas sustancias sea muy amplio. Se determina de momento inmediato ya que con la concentración promedio de los PCB's dentro de los contenedores, es de esperarse afectación inmediata de la salud en caso de contacto directo con los residuos.

El efecto se considera permanente, ya que como se muestra en la investigación de Sinkkonen y Paasivirta (2000) los tiempos de vida media en suelo para los PCB's pueden rondar los diez años para bifenilos tetra y pentaclorados. Para una concentración promedio de 269 ppm en los aceites contaminados, se necesitarían al menos tres tiempos de vida media para reducirse a 50 ppm (la concentración máxima permitida) la concentración de bifenilos. Debido a lo anterior y la dificultad que tienen los métodos naturales para degradar estas sustancias (degradación bacteriana o lumínica) el efecto es considerado a su vez como irreversible.

Finalmente se considera mitigable ya que aunque existen varios métodos de remediación de suelos y tratamiento de aguas contaminadas con PCB's (como se muestra en los antecedentes de la

investigación), estas sustancias también pueden volatilizarse en cierto grado y contaminar zonas más alejadas fuera del área de trabajo. El efecto se clasifica entonces como severo y deben formularse medidas de mitigación adecuadas, a razón del presupuesto reservado para esta índole y la capacidad general de la empresa para solventar estos problemas.

8.3.2.1. Medidas de mitigación

Como se mencionó en los antecedentes, tanto la celulosa del papel así como el metal del núcleo y cableado absorben aceite contaminado, por lo que los residuos de transformadores que no superen el control de calidad deben considerarse como peligrosos y ser tratados con el mismo cuidado que el aceite con PCB's. El plan de la empresa es la exportación de estos materiales junto a los generados durante la limpieza y tratamiento de derrames, sin embargo existe la alternativa de un sistema equivalente al retrolenado y que ahorraría el trabajo de la tramitología y costos de transporte al país meta.

Como medida de mitigación se puede utilizar un tanque cerrado donde se coloquen los residuos contaminados, y agregando aceite descontaminado (o nuevo en su defecto) se puede contra-lixiviar los bifenilos policlorados absorbidos en el material y con esto obtener materiales generalmente revalorizables y libres de toda contaminación medible con las técnicas actuales. El período debería ser similar al de un proceso de retrolenado común (90 días) de manera que igual al tratamiento de los transformadores que se van a reutilizar, deben organizarse con el resto de las actividades de manera que se puedan obtener resultados óptimos y en el menor tiempo posible.

En caso de que se realice un análisis al aceite luego del procedimiento y este tenga una concentración mayor a 50 ppm, este puede declorinarse en el proceso principal como el resto del aceite proveniente de los transformadores de La Compañía. El proceso debería repetirse con otro volumen similar de aceite (el suficiente para sumergir completamente los residuos) hasta que se obtenga la concentración de PCB's deseada. Es importante recalcar que entre más volumen de líquido se utilice, la posibilidad de obtener una concentración baja del contaminante es mayor, pero el costo asociado a su declorinación subsecuente aumenta proporcionalmente.

El equipo que se recomienda utilizar es de tipo reactor cilíndrico, con una entrada por arriba de aceite libre de PCB's, una salida o purga por debajo para aceite que ha retenido el contaminante absorbido por los residuos sólidos y un sistema de mezclado, ya sea que rote sobre su mismo eje o bien un agitador interno de bajas revoluciones para mejorar el contacto sólido aceite y la transferencia de masa. La agitación debe realizarse de manera intermitente para ahorrar energía eléctrica puesto que el proceso tiene una duración promedio de 3 meses.

Al finalizar el drenado del aceite, los residuos pueden disponerse de la manera que se considere adecuada, como reciclaje de los metales, relleno sanitario (en especial la celulosa que sería muy complicado reutilizar debido a su humedad) o inclusive reutilización para arreglo de otro transformador en mejor estado.

En La Compañía se cuenta con programas de aprovechamiento de los residuos enfocado en sistemas de aprovechamiento de metales como el cobre y el hierro. El sistema se divide en procesos de separación y acumulación de los residuos para luego transportarlos hacia la empresa que lo

revalora, de manera que se obtiene un beneficio económico al disponer adecuadamente de este tipo de materiales.

8.3.3. Salida de gases a través de la ventila atmosférica

Es la chimenea de salida de los gases generados durante la declorinación, que salen del tanque de reacción y son procesados para atrapar los gases contaminantes y tóxicos. El sistema consta de un enfriador por aire, un tanque de condensación y varios filtros de carbón activado, con lo que se logra una separación óptima de los gases más contaminantes y no permitir que generen un riesgo ambiental o de salud ocupacional.

8.3.3.1 Caracterización de la mezcla de gases

Debido a que la reacción de declorinación se realiza en una temperatura relativamente alta (90 °C), existe la posibilidad de que se generen vapores de sustancias que generalmente son líquidas a la temperatura de reacción o un arrastre de estos líquidos mediante corrientes de gas. La Royal Society of Chemistry (2014) muestra que la temperatura de ebullición para un bifenilo pentaclorado es 378 °C, mientras que la de fusión ronda los 77 °C. Como lo mencionan Gilbert y Stephen (2011) la presencia de otras sustancias e impurezas generalmente pueden disminuir el punto de fusión de una sustancia, por lo que este efecto aumentaría la posibilidad de tener bifenilos policlorados en forma líquida en el sistema de reacción.

Como se mencionó en el análisis del proceso, según Georgiev, Karamancheva, y Topalova (2007) los compuestos gaseosos que pueden estar presentes debido a la oxidación de los aceites son el monóxido de carbono, dióxido de carbono e hidrocarburos volátiles. Estos gases se pueden encontrarse tanto disueltos en el aceite como volatilizados en el espacio libre dentro del transformador eléctrico.

Como se muestra en el trabajo de Penney (2000) el monóxido de carbono es un gas de alta toxicidad, con efectos variados como daños al sistema cardiovascular y nervioso, mareos, convulsiones, afectación a órganos determinados y hasta la muerte. El dióxido de carbono por lo general solo produce efectos nocivos a la salud en altas concentraciones, por lo que se analizará solo su efecto como gas de efecto invernadero.

Según Ming-Ho (2001) los hidrocarburos volátiles son los compuestos orgánicos cuyo punto de ebullición varía entre 50-100 °C y 240-260 °C, y se encuentran presentes en el aire a condiciones atmosféricas. Entre estos se encuentran los alcanos de 4 o menos carbonos, hidrocarburos aromáticos y alifáticos y algunos alcoholes, ésteres y aldehídos. Son considerados por la Agencia de Protección del Ambiente de los Estados Unidos como uno de los seis contaminantes criterio, debido a sus propiedades irritantes (piel y mucosas) y afectación al sistema nervioso.

8.3.3.2. Equipos

Al final del sistema se tienen los filtros de carbón activado, los cuales tienen distintos usos como como adsorbente. Como define Pradhan (2011) el carbón activado generalmente se utiliza para remover sustancias orgánicas e iones metálicos del aire, gases, agua potable y mezclas del tipo

residual. Su variedad de usos se debe a su porosidad y la gran área superficial que posee, además de que es un material prácticamente inerte a cualquier tipo de material con el que haga contacto.

Sin embargo, según Lodge (1988) no todos los vapores orgánicos pueden ser atrapados en un sistema de carbón activado, ya que hidrocarburos volátiles de bajo peso molecular como el acetileno, etano, etileno, metano, dióxido de carbono, hidrógeno y monóxido de carbono muestran muy poca afinidad con el filtro analizado.

Lo anterior nos indica que los filtros no son utilizados para eliminar la mayoría de los productos de la oxidación de los aceites, sino para un material distinto. Como exponen Lemus, Martín, Palomar, Gómez, Gilarranz, y Rodríguez (2012) la adsorción de compuestos orgánicos volátiles clorados es eficiente y versátil en sistemas de carbón activado, tanto comercial como modificado. Estos filtros son entonces el factor último de seguridad en esta zona del proceso para evitar que cualquier cantidad arrastrada de bifenilos policlorados pueda salir al ambiente circundante.

La regeneración de estos sistemas puede realizarse con un flujo de nitrógeno puro a las mismas condiciones de operación de los filtros, sustancia que ya tiene una función importante en el proceso general y por ende no presenta ningún tipo de costo extra en el sistema. El análisis de impacto ambiental para este aspecto se muestra en la Figura 8.3.

Naturaleza	Persistencia	Momento	Importancia del Efecto
(-)	Fugaz	Inmediato	
Intensidad	Reversibilidad	Extensión	Moderado (-24)
Media	Corto plazo	Puntual	
Acumulación	Recuperabilidad	Periodicidad	
Acumulativo	Mitigable	Periódico	

Figura 8.3. Análisis de impacto ambiental para la salida de gases de la ventila atmosférica

Es de naturaleza negativa debido a los efectos contra la salud que ejercen los hidrocarburos volátiles, además de tener una intensidad media por encontrarse el contenedor con los equipos dentro de un edificio con ventilación reducida. El impacto es de extensión puntual, ya que aunque los gases son transportados mediante corrientes de aire, la baja concentración y relativa reclusión de estos no permite que sean acarreados una distancia importante.

Se considera el efecto como acumulativo debido a que los gases atmosféricos generan efectos de mayor importancia a medida que su concentración aumenta. Se define de carácter periódico ya que se generarán cada vez que se utilice el sistema de decloración, y de momento inmediato ya que las afecciones a la salud como la irritación por efecto de hidrocarburos volátiles se presentarían en menos de un año.

La persistencia es fugaz ya que las propiedades de los gases permiten una dilución de estos en un tiempo mucho menor a un año, y cualquier efecto en un ser humano sería también de duración similar. El efecto es reversible a corto plazo debido a que los contaminantes gaseosos se diluyen en

la atmósfera en un tiempo corto, debido específicamente a su baja concentración. Los efectos a la salud pueden resultar importantes pero siempre con un ámbito de recuperación menor a un año.

Finalmente se define el efecto como mitigable en términos de recuperabilidad, ya que una vez que los gases tienen contacto con la atmósfera no es posible contenerlos nuevamente, sino que deben aplicarse métodos para evitar que estos tengan contacto con los seres vivos. La importancia del efecto se clasifica como moderado por lo que deben generarse acciones de control y compensación para combatir el impacto.

8.3.3.3. Medidas de control y compensación

El tratamiento de los gases que son eliminados mediante el desgasificador es complicado debido a ser mayoritariamente CO y CO₂. Existen metodologías de separación y almacenamiento de estas sustancias, sin embargo la cantidad estimada de gases (no proviene de combustión sino de una degradación muy lenta y leve), la inversión inicial y el mantenimiento necesario hacen prohibitivo económicamente este procedimiento de mitigación.

La alternativa se encuentra en la compensación de emisiones de carbono, metodología muy utilizada en la SETENA y el mundo en general. Generalmente se denominan bonos o créditos de carbono, y como menciona la Empresa The Gold Standard (2012) existen varias metodologías para hacerlo:

- Compra de créditos de carbono: El protocolo de Kyoto establece la cantidad de emisiones que se permite generar a una industria determinada, por lo que si una empresa en específico está por debajo del margen establecido, esta puede vender sus créditos a empresas que sobrepasen su cuota. Se debería determinar a razón de la cantidad de gas generado si la empresa a cargo del proceso emite más de lo permitido o no.
- Inversión en proyectos de investigación: Mediante el apoyo de la ONU, se pueden financiar proyectos de reducción de gases de efecto invernadero, como el caso de producción y desarrollo de energías renovables.
- Inversión en proyectos de reducción de huella de carbono: Se basa en el apoyo económico para fomentar acciones que de una u otra manera disminuyan la cantidad de emisiones de gases de efecto invernadero. Como ejemplo más común se tiene el financiamiento de programas de siembra de árboles, de manera que se cuente con filtros naturales para los gases que se desean eliminar.

De los anteriores el que se recomienda es el último, ya que es el que requiere menor cantidad de trámites y funciona para reducir emisiones, en vez de solamente compensarlas. Es necesario reiterar que según la cantidad de emisiones que se obtengan para la totalidad del proceso, puede que la acción de mitigación se convierta en algo meramente moral, o bien no sea necesario realizar ningún tipo de acción o seguimiento del todo.

Como define el Fondo Nacional de Financiamiento Forestal (2014) En Costa Rica se maneja un programa de financiamiento forestal, de conformidad con la Ley Forestal No. 7575. Se realizan pagos de servicios ambientales para contrarrestar las emisiones de gases de efecto invernadero, mediante sistemas como la conservación de bosques o protección de acuíferos.

Para el control de emisiones de hidrocarburos volátiles (en caso de que la cantidad de estos sea importante) se recomienda la utilización de un sistema de oxidación de alta temperatura como el mostrado por la Oficina Estadounidense de Calidad de Aire, Planeamiento y Estándares (1995), que utiliza un quemador de gases abierto a la atmósfera para convertir gases residuales hidrocarbonados en dióxido de carbono y agua.

La eficiencia generalmente ronda el 95% y la presencia de hidrógeno en esta corriente de gas no incidiría en un riesgo, sino que más bien aumentaría la capacidad calorífica y con esto la eficiencia de la combustión. El quemador debería colocarse por encima del nivel del techo del edificio principal, y la producción de dióxido de carbono se compensaría de la forma que se explicó anteriormente.

El método de combustión en quemador de gases que se recomendó para los hidrocarburos livianos funciona también para el monóxido de carbono, debido a que se oxida de una manera similar formando dióxido de carbono. Es importante destacar que este método debe utilizarse siempre y cuando se ha comprobado la efectividad del sistema de condensación y filtros de carbón activado para la retención de PCB's, ya que de lo contrario implicaría un riesgo mayor debido a la producción de dioxinas y furanos policlorados.

En caso de que se detecten cantidades importantes de bifenilos policlorados en los filtros de carbón activado, estos deben de ser tratados al igual que los demás residuos sólidos generados durante el proceso. La opción principal de la empresa a cargo del proceso es la exportación, sin embargo se analizarán más adelante alternativas de procesamiento que brinden una opción más económica para la destrucción de materiales sólidos contaminados con PCB's.

8.3.4. Salida de gases y vapores del desgasificador

Como se mencionó en el análisis de proceso, el desgasificador es un sistema de termo-vacío que permite la eliminación de gases como el dióxido de carbono, los hidrocarburos volátiles y el monóxido de carbono, generados durante el tiempo de uso del transformador y las operaciones de calentamiento dentro del proceso.

Debido a que en este equipo se generan el mismo tipo de gases hidrocarbonados que en la ventila atmosférica de los reactores de decloración, la evaluación de impacto ambiental realizada para el aspecto ambiental anterior (moderado [-24]) corresponderá de igual manera para este. Para el desgasificador donde se podrían generar vapores de PCB's, se asume que estos tendrán un sistema de carbón activado similar al de la ventila atmosférica, por lo que no presentarían un problema adicional.

Los gases obtenidos pueden conectarse a la tubería de escape final de la ventila atmosférica del reactor y procesarse juntos con estos en el quemador para generar dióxido de carbono, compensándose este de la misma forma a como se hizo con el sistema de tratamiento de gases invernadero generados en el tanque de reacción. El vapor de agua sin embargo puede ser peligroso si es eliminado directamente sobre el área de trabajo, por lo que es necesario un sistema de condensación del mismo.

8.3.5. Generación de aguas residuales en la centrífuga

Como se mencionó en el capítulo 7, la mayor cantidad de residuos del proceso de decoloración se generan en el tanque de reacción, donde son luego separados del aceite por medio de una centrífuga. Debido a que algunos de estos se categorizan como peligrosos, el hecho de utilizar agua como sistema de lavado y separación genera un flujo de aguas residuales cuyas propiedades no permiten un vertido en cuerpos de agua sin un tratamiento adecuado. El análisis de impacto ambiental de este proceso se resume en la Figura 8.4.

Naturaleza	Persistencia	Momento	Importancia del Efecto
(-)	Temporal	Inmediato	
Intensidad	Reversibilidad	Extensión	Moderado (-26)
Media	Medio plazo	Parcial	
Acumulación	Recuperabilidad	Periodicidad	
Acumulativo	Medio plazo	Periódico	

Figura 8.4. Análisis de impacto ambiental para la generación de aguas residuales en la centrífuga

Se considera de naturaleza negativa ya que todos los residuos que se generan pueden presentar un efecto adverso sobre fuentes de agua u otros factores como el suelo. Algunos ejemplos como el aumento del PH del agua residual a causa del hidróxido de sodio y un aumento en la DBO debido a algunos residuos no saponificables, se manifiestan en poco tiempo debido a que se producen con frecuencia. Lo anterior implica que el efecto es por ende de momento inmediato primordialmente por su generación periódica durante cada lote del proceso.

La intensidad se caracteriza como media, ya que aunque es una cantidad importante de agua y una concentración bastante alta de cloruro de sodio (18300 ppm), esta es depositada en un alcantarillado de la zona donde se ubica el proyecto. El hecho de que el efluente natural más cercano se encuentra a casi 900 metros permite una dilución importante de esta sal, por lo que es complicado que por una sola tanda se obtengan valores de 860 ppm (efectos inmediatos) o 230 ppm (efectos a largo plazo) en este cuerpo de agua. Estas concentraciones, como mencionan en su trabajo Hunt, Herron, y Green (2012) son los límites de afectación a la biota de agua fresca. Una constante disposición de estos residuos en el alcantarillado generarían efectos mucho mayores, por lo que se considera de carácter acumulativo.

La extensión del efecto se definirá como parcial, ya que aunque los residuos pueden ser transportados grandes distancias a través del alcantarillado público de la zona, las propiedades afectadas (DBO, PH, Temperatura) se normalizarían en poco tiempo por efectos de dilución y una baja concentración de estos en relación con el cauce de las aguas residuales. El aceite tiene condiciones de persistencia pero no de movilización aérea como los PCB's, por lo que no expandiría el área de afectación de una manera importante como estos contaminantes.

Para este caso en particular se considera una recuperabilidad a medio plazo, ya que con un tratamiento de residuos y aguas residuales debería ser posible obtener un manejo y disposición

adecuada de todas estas sustancias (con un aumento en el margen de costos por supuesto) antes que realicen un efecto de mayor severidad sobre un factor ambiental. La diferencia radica en que se afecta primordialmente el agua, la cual puede ser tratada mediante procesos químicos y/o biológicos hasta obtener características deseables en esta. Otro posible factor relacionado es el suelo pero debido a las características del residuo sería muy improbable que se presente un efecto irrecuperable.

Dentro de la mezcla de residuos se encuentra una proporción apreciable de aceite descontaminado, el cual se mantiene ligado a esta por la no idealidad del proceso de separación. Se considera entonces de persistencia temporal ya que como definieron Murillo y otros (2011) para aceites minerales el tiempo medio de degradación se alcanza aproximadamente a los ocho meses, por lo que su degradación total sería mayor a un año pero menor a la década.

Se define una reversibilidad de medio plazo, ya que sería el tiempo promedio en que los microorganismos en concentración natural y demás reacciones químicas tardarían en eliminar el residuo menos biodegradable de la mezcla. Se define el efecto como periódico debido a que se generarán los residuos cada vez que se declorine una tanda de aceite dieléctrico. El impacto será determinado entonces como moderado y se requerirán acciones correctivas o de compensación para disminuir los efectos de este impacto, en especial sus propiedades acumulativas.

8.3.5.1. Medidas correctivas o de compensación

La empresa a cargo del proceso tiene como plan de mitigación la incineración de las sustancias peligrosas mediante un convenio con una empresa que brinde este servicio, mientras que utiliza las restantes en su planta de neutralización y tratamiento de aguas. Tomando en consideración solamente la empresa que realiza la declorinación y regeneración del aceite, el tratamiento planeado es suficiente medida de mitigación ya que todos los residuos son reutilizados o eliminados de una manera ambientalmente responsable.

Sin embargo, como se concluyó en el capítulo de análisis de residuos, la separación de sustancias como el hidróxido de sodio es complicada o muy costosa. Es por lo anterior que en el capítulo 6 se diseñaron los sistemas de neutralización y evaporación, de manera que se eliminen los subproductos de la declorinación con un menor costo asociado, y los residuos finales puedan ser vertidos en un relleno sanitario común.

8.3.6. Generación de residuos sólidos en los filtros del desgasificador

Según el Applied Research Institute For Prospective Technologies (2007) Debido a las características de los componentes del núcleo y carcasa del transformador, condiciones de trabajo y la generación de productos debido a la oxidación, dentro del aceite dieléctrico se encuentran partículas sólidas que deben eliminarse del producto final, ya que afectan de manera negativa las propiedades del aceite.

Existen los contaminantes denominados como “duros”, como las partículas metálicas que se desprenden de los componentes del núcleo y las partículas de arena y polvo. Entre los principales problemas están el desgaste de superficies metálicas, aumento en fricción dentro del transformador y taponamiento de filtros. Cuando este tipo de contaminantes se convierten en partículas más

pequeñas, se convierten en agentes catalíticos que promueven la oxidación y con esto la formación del otro tipo de contaminantes denominados como “suaves”.

Los contaminantes “suaves” se conforman por los productos de oxidación (ácidos carboxílicos, ésteres, cetonas, entre otros como se muestra en el capítulo de análisis de proceso) y las sustancias generadas a partir de las reacciones que involucran los aditivos dentro del aceite mineral. Debido a su composición resinosa y viscosa estas sustancias pueden producir problemas en las válvulas del transformador e inclusive trabarlas.

Para este análisis se tomarán en cuenta los filtros del desgasificador presente en el sistema de regeneración, ya que este no maneja aceite contaminado con bifenilos policlorados. En caso de que el desgasificador del sistema de declorinación también cuente con filtros similares, los residuos de esta fuente deberán tratarse junto con los demás residuos sólidos contaminados con PCB's que se generen durante el proceso.

Debido a la naturaleza de funcionamiento de los filtros utilizados, los contaminantes presentes en estos serán en su mayoría los denominados como “duros”. A primera instancia estos residuos no deberían presentar una afectación importante en el entorno, sin embargo se encontrarán impregnados de aceite de transformador el cual tiene sus propiedades de persistencia y efectos ambientales mencionados anteriormente. En la Figura 8.5 se muestra un resumen del análisis de impacto para este aspecto en estudio.

Naturaleza	Persistencia	Momento	Importancia del Efecto
(-)	Temporal	Inmediato	
Intensidad	Reversibilidad	Extensión	Irrelevante (-21)
Baja	Medio plazo	Puntual	
Acumulación	Recuperabilidad	Periodicidad	
Acumulativo	A medio plazo	Periódico	

Figura 8.5. Análisis de impacto ambiental para la generación de residuos sólidos en los filtros

Todos los términos que definen el efecto de este aspecto ambiental (exceptuando Intensidad y extensión) se definieron de la misma forma que en análisis anterior, ya que el aceite mineral es la sustancia constituyente que presentan las características de mayor impacto ambiental relacionado. La intensidad es baja puesto que la cantidad de residuos generados es muy poca inclusive contabilizando todas las tandas a realizar. Tomando en cuenta los tamaños promedio de partícula de estos contaminantes “duros”, la cantidad de aceite acumulado será pequeña y no afectará el factor ambiental de una forma importante.

La extensión es puntual debido a lo explicado anteriormente sobre la cantidad neta de aceite, pero además por no ser un material volátil o fácilmente transportable hacia otros factores como aire o agua. El efecto se define como irrelevante, sin embargo por estar tan cercano al límite superior del rango se formularán acciones de compensación para este aspecto ambiental.

8.3.6.1. Medidas de control y compensación

Debido a que los residuos se retienen en la matriz del filtro, son de fácil manejo y disposición ya que no se encuentran en solución con otras sustancias o solventes. Lo anterior aunado con la cantidad relativamente pequeña de estos residuos, implica que se pueden disponer junto a otros desechos sólidos en un coprocesamiento en horno cementero. A pesar de que el aceite no presenta una contaminación importante de bifenilos policlorados, sería complicado y poco beneficioso separarlo de la matriz sólida, por lo que este proceso de tratamiento final a la postre no implicaría un gasto extra para la empresa.

Se unirían estos desechos a otros que normalmente son enviados a estas empresas, y en comparación con estos el peso y volumen de estos residuos (propiedades que definen el costo del servicio) serían de poca importancia. La revaloración de estos residuos mayormente metálicos sería prohibitivamente complicada, debido a que se encuentran en mezcla con aceite mineral y otras sustancias como tierra o polvo.

8.3.7. Torres de adsorción empacadas con Tierras Fuller

El sistema de regeneración de aceite se basa en torres de adsorción tipo empacadas, por lo que debe pasar por los ciclos de proceso, lavado y reactivación del adsorbente. Como se muestra en el proceso de Transoil Services (2012) las Tierras de Fuller pueden reutilizarse entre 200 y 300 veces a través de su reactivación dentro del equipo mediante un proceso denominado “Permasorb” que resulta en un lodo aceitoso representando el 0.2% del total del aceite procesado. Todos los contaminantes atrapados en el adsorbente junto con un remanente del aceite conforman este residuo que no se puede considerar ordinario ya que contienen hidrocarburos aromáticos policíclicos (Beltrán, Berrío, Agudelo, & Cardona, 2013).

Con la información anterior se obtiene que por cada tanda de aceite declorinado, se generarán 1,5 litros de residuos que se necesitan disponer. Este residuo que se obtiene cuando se reactiva la columna de absorción consiste en ácidos producto de la oxidación, lodos, resinas, sustancias volátiles y demás contaminantes sólidos denominados “suaves”. Debido a la similitud de estos residuos se pueden realizar medidas de mitigación similares a la de los residuos de los filtros, tomando en consideración que el sistema de absorción de Tierras Fuller tiene una porosidad mucho mayor que éstos (menor concentración de sólidos). En el cuadro 8.8 se muestra un resumen de los residuos más representativos de esta mezcla aceitosa a tratar, donde la información de peligrosidad se tomó del análisis del tratamiento de residuos.

Cuadro 8.3. Origen y peligrosidad asociada a los residuos del tratamiento con Tierras Fuller

Sustancia	Origen	Toxicidad o impacto
Ácidos carboxílicos	Producto de la oxidación	No peligroso
Ésteres y cetonas	Producto de la oxidación	Persistencia en cuerpos de agua
Aceite dieléctrico	Proceso principal	Persistencia en cuerpos de agua
Compuestos orgánicos volátiles	Calentamiento del aceite	Irritante
Productos de aditivos	Consumo del antioxidante	Posible efecto cancerígeno, toxicidad aguda en agua

Se analizará la mezcla de estos residuos y se determinará su efecto conjunto tomando en cuenta la peligrosidad asociada a cada componente. En el Cuadro 8.9 se muestra el análisis de impacto ambiental correspondiente, asumiendo que los residuos se generan por cada tanda de regeneración realizada (ciclo completo de proceso y regeneración del adsorbente).

Naturaleza	Persistencia	Momento	Importancia del Efecto
(-)	Permanente	Inmediato	
Intensidad	Reversibilidad	Extensión	Moderado (-36)
Alta	Medio plazo	Parcial	
Acumulación	Recuperabilidad	Periodicidad	
Acumulativo	Mitigable	Periódico	

Figura 8.6. Análisis de impacto ambiental para la generación de residuos en las torres de adsorción con Tierras Fuller

Se considera de naturaleza negativa debido a los efectos de persistencia mostrados en el Cuadro 8.8 para la mayoría de las sustancias constituyentes. En la hoja de seguridad confeccionada por Sigma-Aldrich (2014) se muestra que el aditivo butil hidroxitolueno tiene una toxicidad acuática importante, por lo que es de esperarse que sus productos muestren una afectación similar. La intensidad será alta, ya que es una cantidad significativa de residuos con una persistencia y peligrosidad considerable, en especial si son vertidos en un cuerpo de agua.

Debido a las propiedades de la mezcla antes mencionadas, el efecto se considerará acumulativo y periódico, manifestándose cada vez que se regeneran las torres de adsorción de Tierras Fuller. Se considerará como permanente, debido a la presencia tanto de aceite dieléctrico como a otras sustancias de baja biodegradabilidad como los ésteres de ácidos grasos. La posibilidad de contaminación aguda de cuerpos de agua define un efecto de momento inmediato, pues implica un riesgo con una probabilidad elevada de ocurrencia.

Se definirá de extensión parcial, ya que aunque tiene una persistencia importante, la mezcla en su mayoría solo podría transportarse por cuerpos de agua, sin ser afectada significativamente por corrientes de aire o infiltración en el suelo. Como se mencionó anteriormente el sitio se encuentra a una distante importante del río más cercano, por lo que es muy poco probable la extensión de estos residuos a pesar de la gran cantidad generada.

La reversibilidad se considerará de medio plazo, ya que según el Organic Materials Review Institute (2002) tanto el BHT como los productos de su oxidación son catalogados como biodegradables y no persistentes en el suelo. Además de lo anterior el BHT se degrada casi por completo en un período de treinta días, por lo que de las sustancias constituyentes de la mezcla residual, el aceite mineral sería el de mayor tiempo de degradación (entre uno y diez años).

La recuperabilidad se considera como mitigable, ya que los efectos de toxicidad en biota marina podrían representar afecciones difíciles de recuperar aunque se apliquen métodos de

biorremediación o degradación química de los residuos. El efecto es entonces de importancia moderada y se requieren medidas de compensación para mitigarlo.

8.3.7.1. Medidas de compensación o correctivas

Debido a la toxicidad asociada a los componentes de esta mezcla de residuos, estos no pueden ser dispuestos en un relleno sanitario convencional. La solución convencional sería su tratamiento térmico ya sea en horno cementero u otro método adecuado, o bien utilizar algún método de biorremediación de hidrocarburos como los que se mencionan más adelante.

Cabe destacar que los procesos de tratamiento recomendados son necesarios en caso de que los rellenos sanitarios no acepten sustancias poco biodegradables, puesto que si existe una protección de lixiviados adecuada estos podrían ser almacenados en estos lugares hasta que se realice su degradación natural. Para realizar lo anterior debería de analizarse el residuo exhaustivamente y determinar que no exista un riesgo de genotoxicidad o carcinogénico apreciable, de manera que su manejo, transporte y disposición sea seguro para las personas involucradas.

8.3.8. Generación de residuos sólidos debido a las tareas de limpieza y tratamiento de derrames

La generación de sustancias contaminadas o residuos de aceite con PCB's que no pueden ser ingresados al tratamiento de declorinación debido a la dificultad de su separación, se da principalmente durante la manipulación y el drenado de los transformadores. Además de lo anterior se cuenta con un filtro de 500 micrómetros a la entrada del sistema de declorinación, donde se acumularán sólidos gruesos contaminados que puedan encontrarse dentro del aceite antes de que se drene del transformador eléctrico.

Se contempla una estación de lavado de herramientas que han tenido contacto con el aceite de manera que los lavados con disolvente hidrocarbonado son un residuo igual de peligroso que el mismo aceite mineral contaminado. Los derrames de aceite por su parte se tratarán con sistemas polvo seco o similar de manera que se generará otro residuo peligroso sólido. En el Cuadro 8.10 se muestra el resumen del análisis de impacto ambiental para el aspecto definido.

Naturaleza	Persistencia	Momento	Importancia del Efecto
(-)	Permanente	Inmediato	
Intensidad	Reversibilidad	Extensión	
Alta	Irreversible	Total	
Acumulación	Recuperabilidad	Periodicidad	
Acumulativo	Mitigable	Irregular	Severo (-49)

Figura 8.7. Análisis de impacto ambiental para la generación de residuos sólidos por tareas de lavado y tratamiento de derrames.

Se considera un efecto negativo ya que al igual que los residuos sólidos provenientes de la revisión de los transformadores, la concentración de los PCB's puede ser elevada y ocasionar aflicciones tanto en el factor humano como en los demás formas de vida. Al igual que con el segundo impacto ambiental analizado, la presencia de los bifenilos policlorados y sus propiedades le confieren a efecto una intensidad alta.

Es de momento inmediato por la posibilidad de sufrir consecuencias directas como el cloracné si no se utiliza el equipo de protección adecuada, y de periodicidad irregular ya que la acción solo se originaría en caso de residuos sólidos gruesos, un derrame del aceite contaminado o la impregnación de un equipo de protección personal o herramienta con este fluido. Se considera un efecto de extensión total debido a las propiedades de persistencia y movilización de los PCB's, en especial por la gran cantidad de aceite que puede tener contacto con el entorno en términos de un posible derrame.

Como se expuso anteriormente en la generación de residuos debido a la revisión de los transformadores, este tipo de residuo implica un efecto de carácter permanente (mayor a diez años), irreversible y mitigable. Lo último se realiza en este caso en dos etapas: un tratamiento primario de contención (polvo seco o solventes orgánicos) y un tratamiento secundario de remediación. Los PCB's tienen efectos acumulativos sobre el ambiente y la salud humana. El efecto es considerado severo y es por lo tanto que deben establecerse medidas de mitigación adecuadas.

8.3.8.1. Medidas de mitigación

En general el plan de la empresa es el almacenamiento de los residuos de aceite con bifenilos policlorados en contenedores metálicos aprobados, de manera que puedan exportarse a una empresa que pueda disponer de estos siguiendo los lineamientos establecidos por la ley internacional. La tecnología de preferencia para este tipo de residuos sólidos es la incineración mediante un control exhaustivo de la temperatura, de manera que no se liberen dioxinas y furanos a la salida del proceso. La anterior es una medida de mitigación suficiente siempre y cuando se elija una empresa con estándares de trabajo reconocidos y un fuerte apego a la legislación correspondiente.

Se recomienda valorar la utilización de un método de biorremediación para la disposición de estos residuos en el sitio de su generación, de manera que se disminuya la posibilidad de contacto del aceite con un trabajador o el ambiente. La optimización de las medidas de control de derrames y procedimientos de drenado del transformador pueden fomentar la compra de un sistema de biorremediación en vez de realizar un proceso exhaustivo de tramitología relacionada al Convenio de Basilea y el costo de exportación y almacenamiento de los residuos.

La empresa Gator Canada (2014) ofrece un producto para biorremediación de aceites minerales denominado Oil Gator, el cual es una fibra vegetal modificada que contiene bacterias y todos los nutrientes necesarios para mejorar el proceso de biorremediación. El producto se alimenta de hidrocarburos y los degrada hasta producir dióxido de carbono, agua y materia orgánica estabilizada. El tiempo necesario para la degradación de los hidrocarburos y PCB's depende de la cantidad de residuos pero en condiciones normales se espera un 40% de material degradado en un período de un mes, para un tiempo total de tratamiento de 120 días.

Como expone la institución Fluid Environmental Services (2008) El precio de media tarima que contiene treinta bolsas de 13,6 kilogramos es de 773,5 dólares americanos, para un promedio de 1,9 dólares por kilogramo. El costo total debe calcularse agregando los costos de envío, inflación e importación, sin embargo resulta una opción atractiva para el tratamiento de derrames y residuos contaminados con PCB's que no pueden declorinarse en el proceso en estudio.

CAPÍTULO IX: ANÁLISIS DE RIESGO

Uno de los aspectos más importantes a la hora de realizar un nuevo proceso o remodelación de uno ya existente, es el análisis de riesgo inherente a la introducción de sustancias, equipos y operaciones al sistema. Dentro de la teoría y memorias del cálculo puede encontrarse que con el proceso estudiado se obtiene el producto esperado, sin embargo deben realizarse análisis posteriores para determinar si existe algún factor de operatividad o mercado por ejemplo que no permita la implementación del proceso.

Como objetivo de este análisis se tiene la determinación del riesgo de proceso en dos contribuciones de importancia a nivel ingenieril: riesgo de salud ocupacional y riesgo de tipo operacional. Se intentará con esto complementar los métodos y así obtener la información requerida para la confección de un plan de emergencias en un futuro.

9.1. Análisis de riesgo de tipo ocupacional

El análisis de riesgo de tipo salud ocupacional se estudia en términos de factores de riesgo y probabilidad de ocurrencia, para luego generar acciones de eliminación o mitigación de manera que se proteja la seguridad e higiene industrial dentro de la empresa y la integridad de las personas que residen en los alrededores.

Cabe mencionar que debido a que es un proceso nuevo en la empresa, tanto los equipos como las instalaciones (arquitectónicas, eléctricas, ergonómicas) son nuevos, por lo que riesgos de este tipo serán muy escasos. Se realizaron varias visitas durante la etapa de construcción y remodelación de la empresa, y mediante la formulación de listas de chequeo se pudo obtener información para realizar este análisis.

9.1.1. Método de evaluación de riesgo ocupacional

Existen varios sistemas de análisis de riesgo, a razón de las leyes y regulaciones del país donde se utilizan y el nivel de generalización que se desea emplear. Los métodos sin embargo se focalizan en dos características fundamentales del análisis de un factor de riesgo: la probabilidad de que se desarrolle y la severidad o consecuencia de su ocurrencia.

Existe el sistema de evaluación de riesgo adoptado por el Instituto Nacional de Seguros (INS) y que se basa en el implementado por el Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo (INSHT) de España, recomendado debido a su simpleza y que no necesita de mucha información del proceso para la tomas de decisiones (Departamento de Gestión Empresarial en Salud Ocupacional del INS, 2012). Este método utiliza una caracterización de severidad del daño y probabilidad de este, sin embargo el análisis de un riesgo se vuelve ambiguo y poco concluyente debido a los intervalos vagamente definidos para cada efecto.

El otro método utilizado en el país es el adoptado por el Departamento de Seguridad Industrial del ICE (2005), donde se especifica un método de Grado de Riesgo (GR) el cual puede calcularse con la ecuación 9.1 para cada riesgo específico. El grado de riesgo es simplemente la conjunción de los efectos denominados Consecuencia (C) que se espera en caso de la materialización del riesgo, exposición (E) o frecuencia con la que el trabajador se expone al riesgo y la probabilidad (P) de

ocurrencia o grado de certeza de que se complete la secuencia de eventos y las consecuencias se materialicen.

$$GR = C \times E \times P \quad (9.1)$$

El grado de riesgo tiene un valor numérico que depende de la escala de cada efecto, el cual es luego analizado con ayuda de una estimación cualitativa. Cada efecto tiene siete grados de intensidad y esto se desarrolla en seis tipos distintos de riesgo, desde el soportable hasta insoportable. Este método es más elaborado que el anterior ya que necesita de mucha información para desarrollarlo correctamente, por lo que no es acoplable al proceso en cuestión.

El método escogido es un procedimiento intermedio entre los dos explicados anteriormente, ya que utiliza al igual que el primero una matriz de riesgo, pero la escala de intensidad de cada efecto es más elaborada como la del segundo método. Se espera que con la utilización de este método se pueda tener la simplicidad de análisis del riesgo otorgado por una matriz de riesgo aunado a una caracterización de efectos clara y determinada.

El método se denomina Matriz de Evaluación de Riesgos, donde Pickering y Cowley (2010) definen una escala de consecuencia y otra de probabilidad, para luego compararlas en una matriz de caracterización de riesgo como se muestra en La Figura 8.1. Se utilizarán ambas escalas como se muestran en el método pero la descripción de cada una se variará para enfocar los efectos en el proceso que se analiza, debido a que cada matriz de riesgo se debe especificar lo mejor posible con el proceso estudiado, en este caso el ámbito laboral y de salud ocupacional.

9.1.1.1. Consecuencia del daño

Determina la intensidad o efectos adversos que produciría un riesgo específico en la población expuesta en caso de que este suceda. Se basa tanto en la naturaleza del daño como de la anatomía humana, las posibles aflicciones que se podrían generar en este luego de un incidente y en segundo plano la posibilidad de interrupción del proceso. La severidad se divide en cinco niveles de intensidad como se muestran a continuación:

- Insignificante (1): No existe un daño apreciable o importante, además no se requiere atención médica sino que se puede retornar al trabajo sin ningún problema. Generalmente es un daño con una consecuencia efímera y controlada. Como ejemplo se tienen los cortes y magulladuras pequeñas.
- Menor (2): Daño apreciable y de perduración media. Para estos casos es necesario primeros auxilios en el sitio del incidente para controlar las consecuencias del daño pero no es probable que se detenga el proceso ni que el trabajador tenga que incapacitarse. Como ejemplo se tiene irritación en los ojos o la piel, dolor de cabeza y malestares leves.
- Moderado (3): Daño importante y perdurable. Es necesario que el trabajador reciba atención médica inmediata y en caso de tener una labor crítica es muy probable que se detenga el proceso, a menos que otro trabajador sirva de reemplazo por el lapso de recuperación del afectado. Como ejemplo están las torceduras importantes, fracturas menores, intoxicaciones leves, dermatitis y asma.

- Mayor (4): Daño severo y que afecta negativamente la calidad de vida de la persona afectada. El proceso se detiene si el trabajador es indispensable para la tarea asignada y éste sufre una incapacidad de larga duración o permanente. Generalmente se producen daños irreversibles a la salud del trabajador y debe encontrarse un remplazo para su puesto, además de pagar la indemnización correspondiente. Como ejemplo se tiene las amputaciones, lesiones múltiples, cáncer, fracturas mayores e intoxicaciones severas.
- Catastrófico (5): Referente a fatalidad individual o múltiple, o bien enfermedades o daños que acorten severamente la vida.

9.1.1.2. Probabilidad de ocurrencia del daño

Define las actividades a realizar que presentan un riesgo latente y su repetibilidad respecto al horario laboral. En específico se deben considerar aspectos importantes como la sensibilidad particular de un trabajador a un determinado riesgo, fallos en servicios, maquinaria y herramientas, acciones básicas utilizadas para minimizar el riesgo y frecuencia de exposición al peligro.

La definición explícita de los rangos que representa esta caracterización queda a criterio del evaluador. Se pueden definir a razón de varios métodos como la relación entre medidas preventivas y exposición al riesgo, ciclos de repetibilidad o bien la utilización de información proveniente de otras evaluaciones de riesgo con procedimientos y tareas similares. La probabilidad se divide en cinco tipos predominantes como se muestra a continuación:

- Rara (1): Posibilidad muy baja (0%-19%) lo que significa que nunca se ha dado en la empresa o al menos no se tiene información de un incidente asociado al daño.
- Improbable (2): Posibilidad baja (20%-39%) que implica la presencia de información acerca del incidente y que ha sucedido en la empresa. Sin embargo el último incidente no es reciente (más de diez años de antigüedad) y su repetición es prácticamente nula.
- Moderada (3): Posibilidad media (40%-59%) por lo que debe tenerse información al respecto pero la repetibilidad de los incidentes es insignificante. En general han ocurrido uno o dos incidentes en la empresa en su historia o se tiene información sobre una ocurrencia común en industrias similares.
- Muy probable (4): Posibilidad alta (60%-79%) lo que significa que se tiene mucha información sobre incidentes anteriores y su repetibilidad es apreciable a pesar de tener más de un año desde el último percance.
- Casi cierta (5): Posibilidad muy alta (80%-100%) por lo que el desarrollo del incidente es inminente. El daño ha sucedido varias veces en un mismo año y el riesgo que se corre está presente todos los días laborales y es constante durante la jornada laboral.

9.1.1.3. Valoración de riesgo

Con la probabilidad y severidad del riesgo totalmente definidas, se procede a interrelacionar y sumar sus efectos mediante una matriz de valoración de riesgos como la que se muestra en la Figura 9.1. A razón del nivel de consecuencias y la probabilidad de ocurrencia, se estratifica el riesgo respecto a su tolerabilidad relativa a la población afectada.

		CONSECUENCIA					
PROBABILIDAD		Insignificante	Menor	Moderado	Mayor	Catastrófico	
1.0	Casi cierta	Alto	Alto	Extremo	Extremo	Extremo	
0.8	Muy probable	Medio	Alto	Alto	Extremo	Extremo	
0.6	Moderada	Bajo	Medio	Alto	Alto	Extremo	
0.4	Improbable	Bajo	Bajo	Medio	Alto	Alto	
0.2	Rara	Bajo	Bajo	Medio	Alto	Alto	
0							
		0	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0

Figura 9.1. Matriz de valoración de riesgos (Pickering & Cowley, 2010)

La determinación del tipo de riesgo se utiliza para determinar si es necesario mejorar las acciones de mitigación actuales o bien implementar nuevos controles. El tipo de medidas a tomar y la urgencia de aplicación dependen proporcionalmente del riesgo obtenido en la matriz de valoración. En el método de Matriz de Riesgos se presenta una tabla de criterios sugeridos para cada tipo de riesgo (Esta tabla se reproduce en el Cuadro 9.1), de manera que se tenga un punto de partida en la formulación de acciones de mitigación y el intervalo de tiempo en que deben aplicarse (Oficina de planeación de la PGN, 2013). Se escogió este método de análisis y evaluación del riesgo debido a que fue el más completo y que mejor se adaptada al proceso en estudio.

Cuadro 9.1. Nivel de exposición o de severidad del riesgo

Riesgo	Descripción
Extremo	Riesgo extremo, se requiere acción inmediata. Planes de tratamiento requeridos, implementados y reportados a la alta dirección. INACEPTABLE
Alto (A)	Riesgo alto, requiere atención de la alta dirección. Planes de tratamiento requerido, implementados y reportados a los Jefes de Delegadas, Oficinas, Divisiones, entre otras. IMPORTANTE
Medio (M)	Riesgo moderado, aceptable, debe ser administrado con procedimientos normales de control. TOLERABLE
Bajo (B)	Menores efectos que pueden ser fácilmente remediados. Riesgo bajo, se administra con procedimientos rutinarios, riesgo insignificante. No se requiere ninguna acción. ACEPTABLE

Teniendo claro el método de análisis de riesgo que se utilizará, se puede iniciar con la identificación de los factores de riesgo para cada zona de proceso previamente delimitada. Se definirán los controles que se especifican en los planes de seguridad ocupacional de la empresa para cada tarea y se introducirán acciones de mitigación adicionales en los riesgos altos y extremos, de manera que el riesgo se mantenga en condiciones controlables de trabajo. Para los medios y bajos se dispondrán de recomendaciones para disminuirlos lo mejor posible a razón de la intensidad del riesgo estudiado y sus efectos en la población afectada.

9.1.2. Factores de riesgo

Antes de comenzar con un análisis de riesgo, es imperativo determinar cualquier proceso, acción o situación que pueda desarrollarse como un efecto adverso hacia la empresa y los trabajadores que la conforman. La identificación de riesgos debe estar fuertemente ligada a la salud e higiene ocupacional, y determinar tanto la probabilidad del incidente como intensidad o afectación. En el presente análisis se dividirá el proceso en subsecciones a partir de su importancia respecto a toda la operación y el riesgo asociado.

9.1.2.1. Zona de almacenamiento de los transformadores contaminados

Esta sección abarca desde la carga y descarga de los transformadores y su almacenamiento dentro de la empresa hasta el momento en que se llevan a tratamiento. La toxicidad asociada a los bifenilos policlorados es la principal fuente generadora de riesgo en este proceso, seguido por la probabilidad de accidentes debido al peso de los transformadores y las condiciones en que estos se encuentran.

9.1.2.1.1. Carga y descarga de contenedores

Este procedimiento se divide en dos tareas importantes, el traslado del transformador o contenedor desde el sitio de almacenamiento hasta el camión de transporte y la carga o descarga del contenedor. Los riesgos asociados son la posible ruptura de un contenedor debido a una mala manipulación o estructura en mal estado (debido a un almacenamiento por un alto período de tiempo y ataque de corrosión) y la posible caída de un contenedor sobre un trabajador debido a la altura del cajón donde se encuentran. Un riesgo común es el contacto con aceite contaminado con PCB's, debido a un derrame producido por alguno de los incidentes mencionados anteriormente.

La consecuencia de traslado se considera como moderada, debido a que un derrame puede significar un contacto directo con el aceite contaminado, que a su vez implica la posibilidad de cloracné como una afectación de efecto inmediato (además de otras posibles afectaciones a largo plazo). La probabilidad es media, debido a que los contenedores están diseñados para soportar la corrosión y esfuerzo mecánico por largos períodos de tiempo, pero los barriles y otros contenedores se observaron bastante deteriorados debido al contacto con el agua durante el almacenamiento. El riesgo es por lo tanto alto y debe de formularse una acción de mitigación de acción inmediata.

El riesgo de caída de un contenedor del automotor se considera como moderado, ya que puede producir lesiones y fracturas menores en caso de que caer encima de uno de los trabajadores. El proceso principal no se detendría debido al percance pero puede que el trabajador termine incapacitado. El riesgo se cataloga como improbable debido a que este tipo de incidentes suceden muy pocas veces debido a la preparación y experiencia de las personas que realizan este tipo de labores. El riesgo es entonces medio y no es necesaria una medida de mitigación.

9.1.2.1.2. Almacenamiento y riesgo de incendio

El próximo riesgo a contemplar es la generación de un incendio debido a la presencia de un material tan inflamable como el aceite mineral. La consecuencia se considerará como mayor debido a las consecuencias ya conocidas de un incendio como quemaduras y sofocamiento, pero también los efectos de alta toxicidad de las dioxinas y furanos generados por combustión de PCB's. La

probabilidad es sin embargo rara, ya que aunque existe una posibilidad media de un posible derrame de la sustancia, no existen sistemas en la empresa que generen chispa o flama abierta.

A menos que se incurra en una situación especial dentro del área de trabajo (como el contacto de una chispa generada por el montacargas con una nube de vapor de aceite) no existirá un riesgo apreciable. Se estima que el riesgo será plausible cuando se presente un derrame y este no sea tratado inmediatamente, por lo que deben de realizarse acciones de mitigación importantes hasta determinar que no puede suceder (riesgo alto). En el Cuadro 9.2 se presenta el análisis resumido para la carga y descarga de los transformadores.

Cuadro 9.2. Análisis de riesgo para el almacenamiento de los contenedores de aceite contaminado

Factor de riesgo	Probabilidad	Consecuencia	Riesgo
Traslado de los contenedores	Media	Moderado	Alto
Caída de un contenedor	Improbable	Moderado	Medio
Incendio o explosión	Rara	Mayor	Alto

9.1.2.1.3. Medidas de mitigación

Para el traslado de los transformadores y demás contenedores se recomienda agregar una tarea extra de inspección exhaustiva de estos, de manera que se puedan identificar los más susceptibles a un derrame o fuga durante su movilización. Luego de lo anterior se recomienda el uso de equipos de protección personal (EPP) durante la manipulación de los transformadores escogidos como deteriorados durante la carga y descarga, a pesar de los problemas como agotamiento por calor e insolación que se pueden presentar por su uso. El clima de la zona y la estructuración definida de rotación de horarios podrá disminuir los problemas antes mencionados por la utilización de EPP's.

Contemplando una posible situación de incendio debido a un derrame de aceite contaminado, se debe de generar un procedimiento de alto rigor donde se revise el estado de la bodega antes de utilizar el montacargas. Debe de analizarse la integridad de los contenedores antes de subirlos al automotor y determinar cualquier fuga que ha pudo haber ocurrido durante el horario de descanso. En caso de accidente y que se produzca un derrame del aceite, además de la protección personal y tratamiento ordinario, debe de apagarse el montacargas y todo aparato electrónico hasta que se haya terminado por completo de tratar el incidente.

9.1.2.2. Almacenamiento y manipulación del reactivo de sodio

En la hoja de seguridad confeccionada por Sigma-Aldrich (2014) el sodio se clasifica como una sustancia que emite gases inflamables en contacto con agua (Categoría 1, código H260) y como una sustancia altamente inflamable (R15). Como precauciones se tiene evitar el contacto con el agua debido a reacción violenta y posible ignición repentina (P223), manipular y almacenar en atmosfera inerte (P231 y P422), ignición espontánea (P232) y en caso de incendio utilizar polvo seco, químico seco o espuma contraincendios (P370 y P378).

Como medidas de seguridad laboral se recomienda utilizar lentes de seguridad, guantes de nitrilo, ropa y/o delantal de material retardante de flama. Se debe tener a mano respiradores de rostro completo tipo N100 o tipo P3 con respiradores reemplazables tipo cartucho en caso de derrame y

formación de neblina cáustica. Lo anterior es necesario debido a las propiedades corrosivas y de reacción del sodio metálico, y sus riesgos asociados S 26, S36/37/39, S43 y S45.

Debido a las características mencionadas del reactivo de sodio, la posible consecuencia de un derrame de esta sustancia se cataloga como moderado, porque aunque la reacción con agua es violenta y explosiva, el sodio metálico se encuentra en una dispersión de aceite mineral que evitaría un incidente de proporciones catastróficas.

La probabilidad es rara debido a que la sustancia se encuentra en un contenedor metálico generalmente nuevo, por lo que una fuga se ocasionaría en una condición crítica como un golpe que atravesase la pared del contenedor. El riesgo se cataloga como medio y no es necesaria acción inmediata de remediación.

Cuadro 9.3. Análisis de riesgo para el almacenamiento del reactivo de sodio

Factor de riesgo	Probabilidad	Consecuencia	Riesgo
Almacenamiento y traslado	Rara	Moderado	Medio

Como recomendación se tiene que se realice un traslado diferenciado del reactivo de sodio para que se tengan los cuidados y la atención necesarios para evitar un incidente. También es importante mantener el recipiente con el sodio en mezcla constante, de manera que si ocurre una fuga el aceite mineral mantenga en dispersión el reactivo y no ocurra una reacción violenta con la humedad ambiental.

9.1.2.3. Sistema de declorinación química

Debido a que el proceso de declorinación química se importó dentro de un contenedor, las tuberías y distribución están definidas con el espacio disponible dentro de unos de éstos. Es por lo anterior que aunque se separen del contenedor, todos los equipos deben mantenerse a una distancia similar a como se encontraban durante su transporte.

El sistema de declorinación química es homogéneo y unificado, por lo que puede analizarse como un conjunto en un análisis de riesgo. Los equipos que lo conforman son los tanques de declorinación, un desgasificador de vacío, el tanque de mezcla de reactivos, la centrífuga y servicios como los cilindros de nitrógeno, sistema de separación de efluentes y el tanque de sedimentación.

Debido a las dimensiones de los equipos y el acomodo determinado, el espacio disponible para desplazamiento del personal es limitado, de un ancho promedio de un metro. La demarcación de zonas es deficiente a pesar de que el tamaño de los equipos no amerita una zonificación muy elaborada. Otro problema es que para el acomodo de los equipos y su distribución en el reducido espacio, es necesario utilizar mangueras y las tuberías se deben elongar y redirigir varias veces, condensándose en el espacio e incomodando el mantenimiento y revisión de los equipos a utilizar.

Determinando las propiedades del sistema conjunto, se define el riesgo de caída de un trabajador dentro del contenedor, lo cual puede desencadenar incidentes como la ruptura de una tubería o manguera, contacto con superficies calientes como el desgasificador o reactor, inhabilitación parcial

o total de un equipo y ruptura del cristal que separa el proceso general de la salida de gases provenientes del desgasificador (entre ellos vapor de agua). Las consecuencias a la salud provocadas por la caída del trabajador pueden variar desde las magulladuras, golpes en la cabeza, torceduras leves, fracturas y quemaduras leves.

Uno de los aspectos a considerar con mayor atención es la interrupción del proceso debido al incidente mencionado anteriormente. Situaciones como accionar una válvula en el momento inadecuado, presionar un botón del panel de control o la fuga de un fluido debido a la ruptura de una tubería o manguera ocasionan tanto un riesgo a la salud ocupacional como a la interrupción de un proceso productivo, generando pérdidas económicas en ambos aspectos industriales.

Se analizará cada situación generada por el riesgo de caída como un riesgo individual, de manera que se pueda determinar las consecuencias y medidas de mitigación de caso incidente. La probabilidad si será la misma para cada riesgo a menos que sea menor que la de caída de un trabajador, la cual se catalogará como moderada puesto que la posibilidad existe debido al espacio reducido para movilizarse por entre los equipos (aunque no sea muy común el tránsito fluido a través de éste). Generalmente se utiliza el panel de control de proceso y ciertas válvulas se accionan en otras zonas pero luego de finalizar un subproceso, el cual puede durar más de una hora.

Comenzando por el contacto con una superficie caliente, en el peor de los casos se pueden generar quemaduras importantes en el trabajador (consecuencia moderada), dependiendo de la etapa de procesamiento en que se encuentre el desgasificador. La posibilidad de tener contacto con el desgasificador luego de una caída es muy baja (improbable), primeramente porque el equipo está a una altura por encima de un metro, y luego debido a que se encuentra al inicio del proceso, donde la posibilidad de caída se minimiza por el espacio para transitar. Dentro del área de proceso no se encuentran diferencias importantes de altura de suelo o posibilidad importante de derrames, por lo que una caída del trabajador concluiría cuando mucho en magulladuras leves y síntomas asociados a un daño menor. Debido a lo anterior el riesgo de caída regular se considera medio y debe dársele un seguimiento común de salud ocupacional.

Otro aspecto a considerar es la ruptura del vidrio que funciona como ventana de observación del sistema de salida de gases provenientes del desgasificador. En general tienen una probabilidad baja por las mismas razones que el apartado anterior, con la excepción de que se encuentra en la salida y no la entrada de la zona de proceso. La consecuencia del daño varía desde quemaduras infringidas por el vapor de agua hasta las cortaduras consecuencia del contacto con el vidrio quebrado, por lo que el daño se considera moderado y el riesgo asociado se cataloga como medio (por lo que requiere medidas de control preventivas).

Para el caso de ruptura de una tubería o desacoplo de una manguera por efecto de una caída de un trabajador, el riesgo principal relacionado a salud ocupacional radica en el derrame ya sea de aceite contaminado con bifenilos policlorados o solución de sodio en aceite mineral. La problemática de contacto con estas sustancias ya se analizó en el apartado de carga y descarga de transformadores, por lo que se mantiene la consecuencia del daño en moderado. La probabilidad es baja sin embargo, ya que la fuerza necesaria para romper una tubería de metal o uno de los sistemas de conexión de una manguera es alta, por lo que sería necesario un percance de altas proporciones como una caída con gran impulso. El riesgo para este apartado es por lo tanto considerado como medio.

En el Cuadro 9.4 se presenta el análisis resumido para el sistema de declorinación química. Como se denota no se requieren acciones de mitigación importantes, sino que se pueden ofrecer acciones de contención que permitan una disminución apreciable del impacto. Para el presente análisis se formulan las siguientes recomendaciones para reducir la probabilidad de ocurrencia de cualquiera de estos factores de riesgo:

- Realizar un análisis completo de las tareas de cada operario, de manera que se minimice la movilización de estos por entre los equipos y los pasillos angostos.
- Colocar al menos una baranda alrededor de los equipos (tomando como prioridad los que se encuentren con la mayor cantidad de tuberías y mangueras) de manera que se puedan utilizar para evitar una caída.
- Colocar lo más cercano posible los sistemas de atención a emergencias, de manera que se evite un accidente mayor al intentar llegar con celeridad a estos. Además de lo anterior debe realizarse un mapeo de rutas de emergencia para disminuir lo mayor posible la distancia entre los sistemas de atención y las salidas de emergencia.

Cuadro 9.4. Análisis de riesgo para el sistema de declorinación química

Factor de riesgo	Probabilidad	Consecuencia	Riesgo
Contacto con superficie caliente	Improbable	Moderado	Medio
Ruptura del vidrio	Improbable	Moderado	Medio
Ruptura de una tubería o manguera	Improbable	Moderado	Medio

9.1.2.4. Sistema de regeneración de aceite

Este conjunto de equipos y operaciones también se condensan en un solo contenedor para su transporte, en donde se tiene un sistema en paralelo de absorción de partículas con Tierras de Fuller, un desgasificador de la misma naturaleza que el del sistema de declorinación, un tanque de mezcla donde se homogeniza el aceite y además sistemas de adición de aditivos.

Se trabajará con el mismo problema de espacio que el sistema de declorinación química, con la diferencia de que no se encuentra el riesgo de contacto con bifenilos policlorados. Al igual que en el análisis anterior se definirá la caída de un trabajador como una acción de probabilidad moderada, mientras que existirá el riesgo de contacto con superficie caliente (consecuencia moderada e improbable) y golpe por caída (consecuencia menor). Las conclusiones obtenidas para estos aspectos del análisis anterior y la caracterización del riesgo son compatibles con este sistema de regeneración de aceite.

El término de interrupción del proceso debido a la ruptura de una manguera o tubería debe analizarse distinto ya que el riesgo es menor sin la presencia de PCB's. En este caso el contacto con aceite descontaminado sería de consecuencias menores (irritación y malestares leves) y la probabilidad sigue siendo baja por la fuerza necesaria para generar la fuga. En el Cuadro 9.5 se muestra en resumen el análisis de riesgo para el sistema de regeneración del aceite declorinado.

Cuadro 9.5. Análisis de riesgo para el sistema de regeneración del aceite

Factor de riesgo	Probabilidad	Consecuencia	Riesgo
Contacto con superficie caliente	Improbable	Moderado	Medio
Ruptura del vidrio	Improbable	Moderado	Medio
Ruptura de una tubería o manguera	Improbable	Menor	Medio

9.1.2.5. Tratamiento de emergencias

Aunque este aspecto solamente se desarrollará en caso de un derrame de aceite contaminado, es tan importante analizarlo como lo es la generación de sistemas de emergencias y mapeo de riesgos. Se analizará además las tareas de lavado de herramientas contaminadas y revisión de transformadores eléctricos para determinar su reutilización o disposición final.

Lo primero a analizar es la utilización del equipo de protección personal (EPP) ya que su utilización por un periodo de tiempo elevado puede producir sofocación, debilitamiento muscular y deshidratación. Debido a esto se considera un factor de consecuencia menor. Se tomará la probabilidad de ocurrencia tomando como referencia la posibilidad de un derrame o contacto con el aceite contaminado durante la manipulación de los transformadores.

Tomando en cuenta las condiciones encontradas en los contenedores, la necesidad de revisar el núcleo de los transformadores y el constante movimiento de estos para comenzar con la declorinación, se tomará la probabilidad como media. Con estas condiciones se define el riesgo de una afectación directa a la salud por el uso de equipos de protección personal como medio, y se definirán acciones de contención y corrección.

Para el caso del lavado de herramientas contaminadas con PCB's, existe la posibilidad de contacto tanto con la herramienta como con el disolvente utilizado para el lavado. Como se mencionó anteriormente el contacto con una sustancia persistente como los bifenilos policlorados implica un daño moderado, por lo que se tomará esta misma determinación para este caso en particular. Se definirá el factor como improbable ya que el único foco de contacto sería el cuarto de lavado, además de que se desarrollará solamente por un contacto accidental de una herramienta o EPP con el aceite contaminado.

En el Cuadro 9.6 se resume el análisis para este factor en específico. Se formularon las siguientes recomendaciones para disminuir la probabilidad de ocurrencia de estas situaciones y accidentes, utilizando al mínimo los recursos económicos de la empresa:

- Ya que todos los operarios deben contar con sus respectivos equipos de protección personal, se deben establecer horarios estrictos rotatorios, de manera que se minimice el tiempo que una misma persona se encuentra laborando con su EPP completo.
- Es importante capacitar a todos los operarios en términos del lavado de herramientas y equipos de protección personal, ya que sería complicado y riesgoso tener a una sola persona a cargo de estas labores.

- Utilizar la menor cantidad de personal posible, y rotarlo con labores que se realicen al aire libre y sin utilización de equipos de protección personal, de ser esto posible.

Cuadro 9.6. Análisis de riesgo para el tratamiento de emergencias

Factor de riesgo	Probabilidad	Consecuencia	Riesgo
Uso de EPP	Moderada	Menor	Medio
Operaciones de lavado	Improbable	Moderada	Medio

9.1.3. Observaciones y recomendaciones generales hacia la empresa

El objetivo principal de las listas de chequeo era tener certeza de que el proyecto cumpliría con todos los requisitos definidos en el Requerimiento de servicio de La Compañía, y todos los reglamentos que este documento determinara pertinentes. Con la información recopilada se pudieron realizar los análisis anteriores, sin embargo ciertas observaciones se enunciarán en este apartado más como recomendaciones de seguridad que como factores de riesgo.

Según Barquero (2014) en la empresa se contaba con un sitio donde se colocaban las fichas de seguridad (MSDS) pero este no estaba correctamente demarcado. Además de lo anterior el sistema de atención de derrames no daba abasto en términos de una fuga de alto volumen. Es importante resolver estos problemas ya que aunque se realicen esfuerzos arduos para evitar una emergencia, estas pueden suceder en cualquier momento y sería muy peligroso tener un derrame de aceite contaminado sin tener capacidad para retenerlo. Es sabido además que en una emergencia se debe actuar con celeridad por lo que debe identificarse todo lo más claro posible.

En términos generales de seguridad en oficinas y centros de reunión, se tiene la recomendación de que se coloque una escalera de emergencia para el segundo piso, ya que solamente se cuenta con una escalera tipo caracol la cual dificultaría enormemente la evacuación de esta planta. Esta zona se encuentra con buena ventilación e iluminación, por lo que faltaría solamente la actualización del plan de emergencias para tomar en cuenta las nuevas sustancias.

9.2. Análisis de riesgo de tipo operacional

El riesgo operacional se relaciona intrínsecamente con los factores de riesgo relacionados con las operaciones unitarias del proceso, y como estas pueden producir varios tipos de efecto en su entorno. A diferencia del riesgo de salud ocupacional, el operacional puede tener una consecuencia directa tanto en los trabajadores como en el producto final, y afectar el aspecto económico de la empresa en situaciones más allá de lo referido a las garantías sociales del trabajador.

A razón de las metodologías de decisión presentadas por el Instituto Americano de Ingenieros Químicos (1992) se determinó como método de análisis el denominado como HAZOP (en inglés Hazard and Operability Analysis) por su nombre en inglés. Se eligió este método ya que se tiene a mano los diagramas de flujo de proceso, además de información detallada de los sistemas de control automático de los equipos. Además de lo anterior se sabe que este método es recomendado para la etapa de diseño en que se encuentra y para procesos por tandas.

9.2.1. Análisis HAZOP

Es un estudio y herramienta utilizada para determinación de riesgos asociados a procesos en la planta, a base de una segmentación del proceso general y el estudio de las posibles eventualidades que pueden ocurrir. Es uno de los análisis de riesgos más utilizados en el mundo debido a su orden, relativa sencillez y extenso rango de aplicabilidad.

Se realiza una lista de equipos o sub procesos y para cada uno se extienden situaciones o acciones que introduzcan un factor de riesgo en el sistema, para luego enumerar recomendaciones y observaciones en general para cada problema generado (Hyatt, 2003).

El Instituto Americano de Ingenieros Químicos (1992) muestra al método HAZOP cómo un método que se definió en un principio para un nuevo diseño o tecnología, y que se reproduce de la mejor manera si es realizado por un equipo interdisciplinario de expertos. Lo anterior no se definirá como importante debido a que el análisis que se desea es preliminar, además de que este método genera los resultados óptimos para el uso a futuro de la información. Otro aspecto a considerar es que la mayoría del equipo de declorinación química y regeneración se encuentra automatizado, por lo que se enfocará el método en los procesos que cuenten con menor cantidad de sistemas de control automático.

La metodología se basa en la separación del proceso general en “nodos de estudio” generalmente representados por un equipo o sistema de importancia. Para cada uno de estos nodos se definirán palabras guía, las cuales se combinarán con parámetros de diseño para representar factores de riesgo denominados como “causas”. En el Cuadro 9.7 se muestran las palabras guía más comúnmente utilizadas en este tipo de análisis, aunque no debería limitarse el procedimiento al uso exclusivo de estos ejemplos mostrados.

Cuadro 9.7. Palabras guía comúnmente utilizadas para un análisis HAZOP

Palabra guía	Significado
No	Ausencia o negación del criterio de diseño
Más	Incremento cuantitativo del parámetro
Menos	Decremento cuantitativo del parámetro
Parte de	Disminución cualitativa
Además de	Aumento cualitativo
Inverso	Obtención de un efecto opuesto al esperado
Diferente de	Sustitución completa

Luego de definir las causas, es posible generar las consecuencias relacionadas con estas, los sistemas de seguridad necesarios y las recomendaciones definidas para minimizar la probabilidad de ocurrencia del riesgo.

Como resultado final se tendrán los riesgos de operación a considerar en un manual de atención de emergencias y las acciones de mitigación para mejorar los sistemas de control de proceso. Se definen las protecciones como los sistemas de control de proceso ya existentes en los equipos e instrumentación de la empresa, pero que son insuficientes para mantener el riesgo operacional en un nivel aceptable.

En el Cuadro 9.8 se muestra un ejemplo de la aplicación de la metodología HAZOP en un sistema de reacción por tandas de fosfato diamonio. Se definen las situaciones o acciones de riesgo según causa y efecto, y finalmente recomendaciones para solventarlas. En la Figura 9.2 se muestra el diagrama de flujo de proceso, para ejemplificar mejor la información del HAZOP.

Cuadro 9.8. Segmento de un análisis HAZOP para un sistema de reacción por lotes

Desviación	Causas	Consecuencias	Protecciones	Acciones
Nivel alto	Introducción de amoniaco en el tanque sin tener el espacio adecuado disponible	Posible liberación de amoniaco en el área de trabajo	Indicador de nivel en el tanque de almacenamiento	Revisar el procedimiento de introducción de amoniaco al tanque de almacenamiento para asegurar que hay espacio disponible.
	Indicador de nivel falla (bajo) en tanque de amoniaco		Válvula de alivio del tanque de almacenamiento a la atmósfera.	Considerar mandar el gas proveniente de la válvula de alivio a un sistema de tratamiento. Considerar agregar una alarma independiente de nivel alto en el tanque.
Flujo alto	La válvula A de control de flujo de amoniaco falla (abierta)	Amoniaco sin reaccionar llega al tanque de almacenamiento de fosfato de amonio y sale al ambiente	Revisión periódica de la válvula A	Considerar agregar una alarma/apagado del sistema para niveles altos de flujo de amoniaco al reactor.
	Indicador de flujo falla (bajo)		Detector de amoniaco y alarma	Asegurarse que la inspección y mantenimiento de la válvula A son adecuados.
	Operario indica muy alto el nivel de flujo de amoniaco			Asegurarse una adecuada ventilación del área de trabajo y considerar conseguir un tanque cerrado de almacenamiento de fosfato de diamonio.

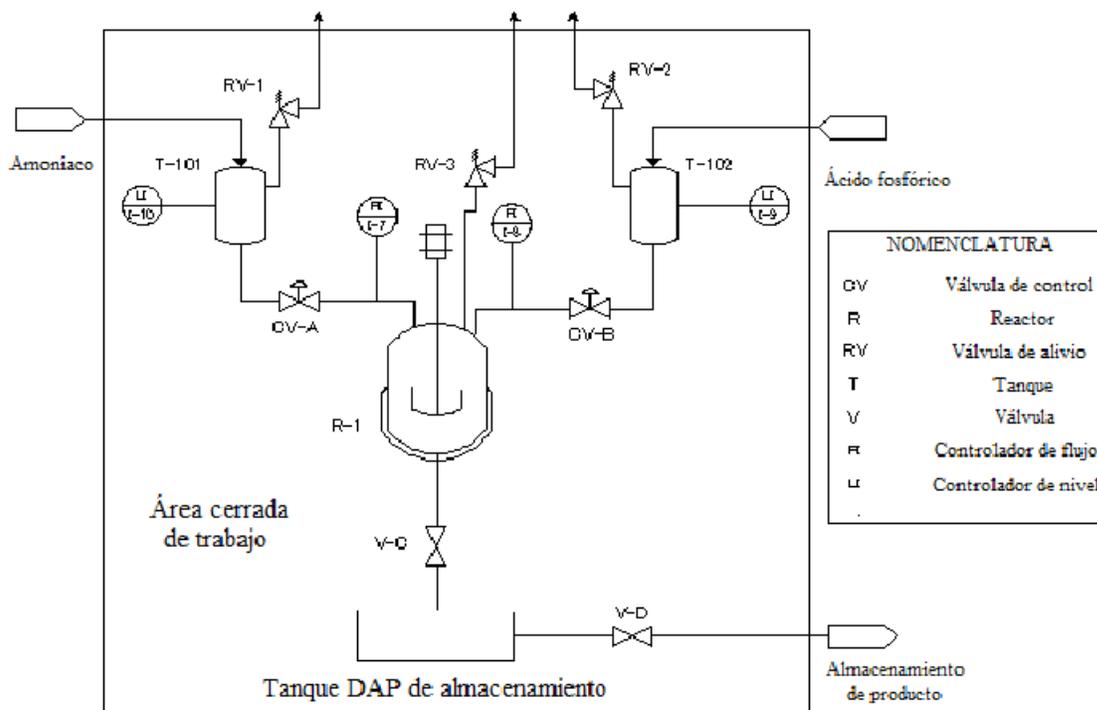


Figura 9.2. Diagrama de flujo de proceso para el sistema por lotes (Adaptación de Batres, Takashi, Shimada, & Tetsuo, 2008)

9.2.2. Evaluación de riesgo de proceso

A continuación se presentará el análisis HAZOP aplicado para el proceso analizado, dividido cuantitativamente en nodos de estudio para mejorar el enfoque del método. Se tomará como supuesto que el sistema de control y alarmas provisto en el panel de control de cada módulo no fallará, pero como este puede apagarse se analizará como una protección no del todo segura. Se recomendarán medidas de control suplementarias cuando se concluya que sea necesario.

Se dividió el sistema en seis nodos primarios, representando los subprocesos de mayor importancia del tratamiento del aceite. Para cada nodo se realizará un HAZOP independiente, pero estos se verán intrínsecamente relacionados por las conexiones físicas entre cada subproceso.

9.2.2.1. Sistema de inyección de nitrógeno

En este subsistema se tomará en cuenta el cilindro de nitrógeno en funcionamiento y los equipos a los cuales se alimenta el gas, siendo estos el tanque de mezcla para preparación de dispersión de sodio, el cilindro de almacenamiento de dispersión de sodio y los tanques de dechlorinación química. Se define como análisis cuantitativo por lo que las palabras guía de mayor importancia serán de esta índole, y como sistemas de control se tendrá solamente las válvulas de apertura y manómetro del cilindro de nitrógeno.

Cuadro 9.9. Análisis HAZOP para el sistema de inyección de nitrógeno

Desviación	Causas	Consecuencias	Protecciones	Acciones
1.1 No hay flujo	Válvula falla (cerrada)*	Riesgo de explosión por reacción de sodio metálico con humedad ambiental	Manómetro del cilindro de nitrógeno	Considerar la utilización de una alarma de nivel bajo del cilindro, para evitar que se vacíe y el operador no se dé cuenta.
	El cilindro está vacío			Realizar una revisión periódica de la válvula, manómetros y las conexiones y líneas de transporte de nitrógeno para descartar fugas.
	Fuga en cilindro o manguera de transporte			Considerar la compra de una válvula con medición de flujo y control automático de este.
1.2 Más flujo	Válvula falla (abierta)*	Sobrepresión desconocida en los tanques receptores	Manómetro del cilindro	Considerar la compra de una válvula de medición y control de flujo.

*Se contemplará ambos fallos de una válvula pues no se tiene información del tipo de válvula a utilizar

Del análisis anterior se contemplan las siguientes observaciones:

- No se contempla flujo inverso ya que los receptores manejan siempre sustancias líquidas a presión atmosférica, por lo que un regreso de estos por la línea de gas no sería posible en condiciones normales de operación.
- El estudio de bajo flujo sería muy similar al de no flujo para este análisis, con la diferencia de que la válvula no fallaría totalmente. Se toman las recomendaciones de flujo nulo como suficientes para tratar este riesgo, por lo que no se agregó en el cuadro HAZOP de análisis.
- Se asume que ninguna de las sustancias contienen contaminantes de importancia dentro de sus contenedores originales, por lo que no es necesario contemplar posibles efectos adversos relacionados a este aspecto.

9.2.2.2. Sistema de distribución de sodio metálico

Este nodo es representado por el cilindro de sodio metálico, la balanza para determinar el nivel dentro del contenedor, la entrada de nitrógeno (que desplaza el sodio y genera su movimiento hacia afuera del cilindro) y el tanque de mezcla para ambientar la solución antes de los reactores. El sistema no cuenta con un sistema de control de nivel electrónico o válvulas reguladas por este medio.

Cuadro 9.10. Análisis HAZOP para el sistema de distribución de sodio metálico

Desviación	Causas	Consecuencias	Protecciones	Acciones
2.1 No hay flujo	Balanza falla o no es revisaba por el operario	Mezcla incompleta aceite/sodio	Balanza	Considerar agregar una alarma complementaria para nivel bajo de sodio.
	No hay entrada de nitrógeno (1.1)	Aceite no declorinado sale del reactor		Utilizar una válvula de flujo que tenga un sistema de control automático
	Válvula falla (cerrada)			
2.2 Más flujo	Demasiado nitrógeno dentro del contenedor de sodio (1.2)	Mezcla incorrecta de aceite/sodio		Considerar el uso de válvulas de flujo y control automático
	Válvula falla (abierta)	Exceso de sodio metálico en los productos de reacción		
2.3 Menos flujo	Nivel bajo de sodio en cilindro	Mezcla incompleta en el tanque de medición de sodio	Balanza	(Igual que en punto 1.1)
	Operador no revisa la balanza a tiempo.	Derrame de sodio metálico en la zona de trabajo		Revisión periódica de la línea y conexiones a los equipos y contenedores
	Ruptura o fuga			
2.4 Flujo inverso	Poca cantidad de gas nitrógeno (1.1)	Contaminación del cilindro de sodio con aceite mineral	Manómetro del cilindro de gas	(Igual que en punto 1.1)
	Fuga de gas nitrógeno o dispersión de sodio			Colocación de una válvula check a la salida del contenedor de sodio

9.2.2.3. Sistema de tanques de reacción

Este es el nodo más importante del análisis, además de ser el más complejo por ser el punto de conexión de los otros nodos estudiados. El sistema consta de los dos tanques de declorinación colocados en paralelo, conectados por el sistema de calentamiento y recirculación del aceite, y un tanque de agua en caso de necesitarse esta sustancia luego de la reacción.

Finalmente se deben tomar en cuenta las tuberías de conexión del sistema de nitrógeno, aceite deshidratado, la salida de gases generados de los reactores y mezcla de sodio metálico y aceite

tratado. Cabe destacar que los riesgos asociados al nitrógeno gaseoso ya se analizaron en el HAZOP del sistema de distribución de este gas.

Cuadro 9.11. Análisis HAZOP para el sistema de tanques de reacción

Desviación	Causas	Consecuencias	Protecciones	Acciones
3.1 No hay aumento de temperatura inicial	Calentador y/o sensor falla	No se realiza la reacción	Sensor y controlador de temperatura	Revisión periódica del calentador eléctrico, y un medidor secundario de temperatura
3.2 Más flujo de aceite	Válvula de entrada falla (abierta)	Mayor presión en tanque Declorinación incompleta	Válvula de entrada	Conseguir una válvula que cierre en fallo, además de realizar revisiones periódicas Colocar una válvulas de alivio de presión
3.4 Más temperatura	(Igual que en punto 3.1)	Aumento de presión Aceite comienza a degradarse	(Igual que en punto 3.1)	Colocar una alarma de alta temperatura Colocación de una válvula de alivio Apagado de emergencia del calentador y aumento simultáneo de la agitación
3.6 Menos flujo de aceite	Fuga en tuberías Válvula de aceite falla (cerrada)	Derrame de aceite contaminado Sodio sin reaccionar dentro del tanque de declorinación	Válvula de aceite	Revisión periódica de líneas de tubería Definir la cantidad de sodio en el tanque y agregar la cantidad de aceite necesaria para su procesamiento
3.7 Menos temperatura	(Igual que en punto 3.1)	Reacción lenta o incompleta	(Igual que en punto 3.1)	Colocar una alarma de baja temperatura Colocar un calentador secundario
3.8 Menos flujo de mezcla de sodio	Fuga en tubería Válvula de entrada de sodio falla (cerrada)	Declorinación incompleta Derrame de sodio en el área de trabajo	Válvula de entrada de sodio	Revisión periódica de las líneas y válvulas de control

Cuadro 9.11. (Continuación) Análisis HAZOP para el sistema de tanques de reacción

Desviación	Causas	Consecuencias	Protecciones	Acciones
3.9 Menos agitación	Motor de rotación falla	Mala dispersión dentro del tanque	Determinación auditiva	Medidor y/o controlador de revoluciones
		Declorinación incompleta		Revisión periódica del motor y el agitador mecánico
3.10 Flujo inverso	Válvula de entrada de sodio y/o la de aceite falla(n) [abierta(s)]	Contaminación del tanque de medición de sodio y/o desgasificador	Válvulas de entrada y control	Revisión periódica de válvulas
				Conseguir válvulas que cierren en fallo y válvulas check en ambas líneas
				Colocar una alarma de flujo que se active solamente durante la declorinación
3.11 Además de agua	Desgasificador no deshidrata el aceite (caso 5)	Reacción exotérmica o explosión	Desgasificador	Acciones de mitigación mencionadas en el caso 5 del HAZOP
		Formación de hidrógeno		
		Declorinación incompleta		
3.12 Diferente de aceite	Válvula de tanque de agua falla (abierta)	(Igual que en el punto 3.11)	Válvula de entrada de agua	Revisión periódica de la válvula
	Operario no cierra la válvula luego de su utilización			Alarma de flujo que se active durante declorinación
				Colocar una válvula que cierre en fallo y durante declorinación

9.2.2.4. Centrífuga de lavado del aceite dieléctrico

Es un nodo que consta de la centrífuga, el receptor de lodos, recipiente de sólidos acumulados y las tuberías de entrada y salida. Trabaja generalmente a presión y temperatura atmosférica, aunque los residuos de la declorinación pueden estar a una temperatura mayor. La centrífuga se encuentra automatizada al igual que el sistema de declorinación, sin embargo esto no implica que el riesgo de situaciones adversas sea despreciable.

Cuadro 9.12. Análisis HAZOP para la centrífuga de lavado del aceite dieléctrico

Desviación	Causas	Consecuencias	Protecciones	Acciones
4.1 Más aceite	Válvula de aceite falla (abierta)	Disrupción del proceso	Válvula de flujo de aceite	Colocar una válvula que cierre en fallo
		Producto contaminado y fuera de especificación		Revisión periódica de las válvulas y controladores
		Presión alta en la centrífuga		Alarma de alto flujo de aceite
4.2 Más agua de lavado	Válvula de agua falla (abierta)	Presión alta en la centrífuga	Válvula de flujo de agua	Colocar una válvula que cierre en fallo.
		Disrupción del proceso		Alarma de flujo alto en tubería de agua
		Gran cantidad de agua contaminada		Revisión periódica de las válvulas y controladores
4.3 Menos aceite o agua	Fallo en válvula o bomba correspondiente	Producto contaminado	Válvulas de control	Alarmas de flujo para ambas líneas de proceso
	Fuga de líquido	Disrupción del proceso		Sistema de control especializado en mantener la relación aceite/agua en la centrífuga
		Separación deficiente de las fases		Revisión periódica de las tuberías y válvulas para determinar su estado actual
		Derrame de residuos peligrosos		

9.2.2.5. Desgasificador de aceite dieléctrico

Este sistema consta del recipiente donde se encuentra el aceite contaminado o declorinado (dependiendo de cuál desgasificador se trate), el desgasificador, las tuberías de entrada y salida, el calentador eléctrico, la bomba de vacío y el sistema de recirculación de aceite. Este último procedimiento se realiza para enfriar un poco la resistencia eléctrica, mediante el paso del aceite por la válvula de entrada (V-1), la de salida (V-2) y la de recirculación (V-R).

El sistema consta de una alarma de vacío insuficiente, una para sobrecarga de las bombas de flujo y otra para un valor fuera del rango determinado en el controlador de temperatura. Todas las alarmas son visuales y sonoras, pero se cuenta con un botón denominado “manual” que detiene el control automático y alarmas por lo que existe el riesgo de accidentes a pesar de estas.

Cuadro 9.13. Análisis HAZOP para el desgasificador de aceite dieléctrico

Desviación	Causas	Consecuencias	Protecciones	Acciones
5.1 No hay flujo	V-1 falla (cerrada)	No hay recirculación	Manómetro de presión	Cambio por una válvula se abra en fallo.
	Filtro de partículas obstruido o dañado	Aumento de presión		Alarma de presión elevada
	Fuga en tubería	Golpe de ariete		Revisión periódica de los filtros, tubería y V-1
		Proceso detenido		Definir tiempo promedio de obstrucción de los filtros
5.1 No hay flujo		Derrame de aceite contaminado		
5.2 Más temperatura	Sensor y/o controlador de temperatura falla	Aumento de presión	Sensor y/o controlador de temperatura	Colocar una válvula de alivio de presión
				Alarma de alta presión
5.3 Menos temperatura	Sensor y/o controlador de temperatura falla	Aceite no deshidratado	Sensor y/o controlador de temperatura	Definir un mayor tiempo de proceso
			Válvula de control V-1	Revisión y calibración periódica del controlador y sensor Colocar un sensor de humedad
5.4 Menos presión	Bomba de vacío falla	Aceite no deshidratado	Lector digital de presión	Colocar sensor de humedad
	Lector de presión falla			Revisión periódica del lector digital de presión
5.5 Menos aceite	V-2 falla (abierta)	Aceite no deshidratado	Válvula de control V-2	Colocar una válvula que se cierre en fallo, revisión periódica.
	Fuga en tubería	Derrame de aceite contaminado		Colocar sensor de humedad Revisión periódica de la tubería

Cuadro 9.13. (Continuación) Análisis HAZOP para el desgasificador de aceite dieléctrico

Desviación	Causas	Consecuencias	Protecciones	Acciones
5.6 Flujo inverso	Válvula V-1 falla (abierta)	Proceso detenido	Válvula de control V-2	Colocar una válvula que se cierre en fallo
	Activación de reciclo durante el proceso	Aceite no deshidratado		Revisión periódica de la válvula V-1
		Proceso debe reiniciarse completamente		

9.2.2.6. Sistema de regeneración del aceite dieléctrico

Este nodo consta de las torres de adsorción de Tierras Fuller y el sistema de adición de aditivos. Como este proceso se realiza sin la utilización de químicos peligrosos y a temperatura y presión ambiente, el riesgo de proceso asociado es bajo. Se cuenta con válvulas a la entrada y salida de cada torre y una bomba de empuje de aceite al sistema en paralelo de regeneración.

Cuadro 9.14. Análisis HAZOP para el sistema de regeneración del aceite dieléctrico

Desviación	Causas	Consecuencias	Protecciones	Acciones
6.1 No hay flujo	Válvula de entrada falla (cerrada)	Proceso detenido	Manómetro de presión	Cambio por una válvula se abra en fallo.
	Válvula de salida falla (cerrada)	Aumento de presión		Revisión periódica de la tubería y válvulas
	Fuga en tubería			Controlador que apague la bomba en caso de un aumento considerable de presión en la tubería
6.2 Más flujo	Válvula de entrada falla (abierta)	Aumento de presión	Manómetro de presión	Alarma de flujo elevado en válvula de entrada
		Aceite no regenerado		Revisión periódica de válvulas y manómetro

9.2.3. Conclusiones generales del análisis HAZOP

Luego de determinar los posibles focos de riesgo operacional en cada nodo o segmento del proceso, se determinó que varios tipos de riesgo se repitieron en varios de los nodos del sistema. Se recomendó principalmente las válvulas que cierran en fallo, ya que interrumpen el flujo de proceso y evitan que haya mezclas incorrectas de sustancias o que generen un riesgo ocupacional inmediato.

Es importante tener en cuenta que inclusive teniendo el sistema de alarmas provisto en el sistema de dechlorinación y regeneración de aceite, en la manera de lo posible deben de tenerse al menos dos medidas de mitigación, ya que existe la posibilidad de que una falle. Existen riesgos de importancia en este tipo de procesamiento (explosión dentro de un reactor por ejemplo) y la mayoría se relacionan intrínsecamente de tal manera que uno origina al otro en el siguiente nodo de operación.

Deben realizarse revisiones periódicas de todas las válvulas y líneas de flujo de proceso, de manera que se realicen lo más consecutivamente posible como lo permita la operatividad del proceso y costo asociado. Como es un método por tandas no se espera la ocurrencia de fugas hasta un desgaste importante de las tuberías, pero la peligrosidad asociada del aceite contaminado y el sodio metálico implica un riesgo elevado en caso de una fuga o derrame.

Para el caso de aumento de presión dentro de los equipos en estudio, debería de analizarse el aumento crítico de presión que se puede esperar para cada caso, y con la información del material con el que se construyó el equipo, determinar el riesgo de ruptura o deformación del metal. Lo anterior es necesario para determinar la necesidad de una válvula de alivio de presión, debido a que su instalación implica un costo elevado y se necesita atravesar la pared de los tanques, comprometiendo la hermeticidad dentro de estos equipos.

Es importante mencionar que este análisis se realizó con la idea de que los operarios entienden completamente los procesos realizados y la función de todos los equipos y válvulas. Esto se asume debido a la simplicidad de las operaciones realizadas y las capacitaciones que se realizarán por parte del personal de la Empresa que diseñó los equipos.

CAPÍTULO X: ANÁLISIS DE LA PRÁCTICA DIRIGIDA

Luego de la conclusión de los análisis de cada aspecto determinante del proceso de decoloración, es necesario recapitular y estipular los factores que facilitaron o dificultaron la realización del trabajo. Lo anterior se realiza de manera que se pueda definir y cuantificar los beneficios obtenidos por la realización de la práctica dirigida tanto para el estudiante como para las empresas involucradas en el proceso que se estudió.

10.1. Facilidades y oportunidades

Dentro de este aspecto se definirán los insumos y facilidades que otorgaron tanto la Compañía como la empresa encargada del proceso, la Universidad de Costa Rica e instituciones similares. Cabe recalcar que al ser un proyecto de trabajo final tipo práctica dirigida, generalmente se requiere de una mayor cantidad de recursos e insumos para realizarlo.

En la Compañía se facilitaron las instalaciones en caso de necesitarlas para trabajar en los análisis y demás estudios realizados, además de que se ofreció todo el apoyo técnico y humano para apoyar las labores del estudiante. Entre algunos ejemplos se tiene la realización de giras a los diferentes planteles de la Compañía, toma de muestras de aceite para su estudio, transporte y se brindó información de suma importancia para el análisis del proceso relacionado directamente con la Compañía.

La empresa encargada del proceso permitió dos visitas a las instalaciones, una al inicio de la etapa constructiva y otra cuando se estaba a la mitad de este proceso. Además de lo anterior otorgó la información de los planes para el proceso nuevo (seguridad ocupacional, calidad, emergencia, trabajo y manejo de residuos), diagrama de flujo de los equipos a importar y toda la demás información que les perteneciera legalmente.

En la Universidad de Costa Rica se tuvo la facilitación de información por medio de bases de datos profesionales, gran cantidad de libros relacionados al tema y consulta técnica con profesores expertos sobre temas específicos necesarios para los análisis. Además de lo anterior siempre se tuvo acceso a instalaciones y tecnología para apoyo del estudiante y el acceso a contactos con otras instituciones que podrían brindar beneficios clave para la realización del proyecto.

En el Centro de Investigación de Productos Naturales (CIPRONA) se facilitaron los reactivos, cristalería y equipo de Cromatografía de gases acoplado a un espectrofotómetro de masas. Gracias a esto se pudo obtener una composición química promedio del aceite propiedad de la Compañía, para así realizar un análisis de proceso adecuado.

Se obtuvo accesibilidad a información importante en muchas instituciones del Estado como el Ministerio de Obras Públicas y Transportes, Secretaría Técnica Nacional Ambiental (SETENA), Dirección de Gestión de Calidad Ambiental (DIGECA), entre otras. Instituciones privadas como el Colegio de Ingenieros Químicos y profesionales Afines (CIQPA) también brindaron gran cantidad de información para la realización de los análisis.

En general el conocimiento adquirido durante los cursos optativos de la Universidad permitió la utilización de métodos de trabajo con los que ya se tenía cierta familiaridad, mientras que los cursos

regulares permitieron establecer el proceso como un objeto de estudio que debía ser analizado por los distintos aspectos seleccionados. Las consultas realizadas a varios profesionales de la Universidad de Costa Rica brindaron una gran cantidad de información que no se encontró en la literatura regular.

10.2. Obstáculos y dificultades

A pesar de toda la ayuda otorgada por las personas e instituciones mencionadas anteriormente, se generaron varios problemas durante la realización de la práctica dirigida. La mayoría de estas dificultades no pudieron preverse con una planificación adecuada y definición de los métodos de trabajo, ya que surgieron cambios durante la práctica que variaron significativamente el plan que se tenía esquematizado.

El principal obstáculo fue la falta de información, a pesar de que se obtuvo una gran cantidad de esta por parte de ambas empresas involucradas. Debido a que la práctica transcurrió en el ámbito de preparación legal del proyecto, y ocurrieron atrasos fuera del control de los asociados, no se pudo presenciar la puesta en marcha del proceso estudiado. Los documentos obtenidos fueron suficientes para realizar los análisis con la precisión que se estableció, sin embargo fue necesaria una investigación exhaustiva sobre procesos similares para amalgamar la información y establecer parámetros que no se tenían del todo claros.

Otra dificultad fue la amplitud del tema a desarrollar, junto con su delimitación como proyecto de graduación de licenciatura. Como es sabido el análisis completo de un proceso puede ser un trabajo de meses e inclusive realizado por un equipo multidisciplinario de profesionales, por lo que era de suma importancia determinar la profundidad con que se trataría cada aspecto en estudio. Se estableció como objetivo un análisis de proceso preliminar, como el realizado cuando se investiga un proceso nuevo y desea estudiarse su factibilidad para implementarlo en un futuro cercano.

Existieron ciertas dificultades menores como trabas legales, no disponibilidad de recursos, dificultades de comunicación y la necesidad de obtener conocimientos para realizar algunas de las tareas del proyecto. Lo anterior concluyó en una cantidad importante de tiempo muerto, el cual es común en proyectos donde se requieren permisos, insumos e información de otras empresas.

10.3. Resultados obtenidos y conclusiones de los análisis

En este apartado se definirán y esquematizarán los resultados obtenidos durante la realización de la práctica dirigida, de manera que se analice si se cumplieron los objetivos que se establecieron. Es importante recalcar que la finalidad de este trabajo era la obtención de un beneficio teórico/práctico, por lo que las conclusiones se definirán con respecto a este argumento.

Con la realización de la investigación bibliográfica, se logró obtener una base teórica suficiente para definir los antecedentes del proceso, de manera que se pudiera obtener una idea general de este. Toda esta información estableció las bases para realizar los análisis, y permitió un mejor entendimiento del aceite, los transformadores, sus contaminantes y el proceso de declorinación con sodio metálico.

El análisis de tramitología fue sumamente beneficioso para la Compañía, ya que estableció los reglamentos que le competen a la realización del proceso, además de los permisos necesarios para iniciarlo. En específico se requería la información de tramitología referente al Colegio de Ingenieros Químicos y Profesionales Afines, de manera que se establecieran los documentos y planos que se necesitaban para realizar el proyecto siguiendo los lineamientos de la Ley orgánica que lo rige. Con esta información se pudo asegurar la legalidad del proceso y la corroboración de que la empresa encargada iniciara labores con todos los permisos y trámites requeridos.

Con el análisis del proceso de declorinación, se pudo ahondar en los detalles de la reacción, como las características de los reactivos y productos, mecanismos, equipos necesarios y características generales (presión, temperatura, entre otras). Lo anterior permitió un mejor entendimiento del proceso, de manera que se tuviera la información necesaria para realizar los análisis posteriores a éste. Al ser un proceso nunca antes realizado en el país, es de suma importancia que se encuentre sumamente estudiado, de manera que no existan problemas inesperados al ejecutarlo.

Con el análisis de los sitios de almacenamiento, se logró establecer el estado físico de los contenedores de aceite contaminado con PCB's perteneciente a la Compañía, y con esto definir recomendaciones a razón de lineamientos internacionales. Además de lo anterior se logró establecer mejoras a las instalaciones de almacenamiento, de manera que se disminuyera el riesgo de fuga y contacto de cualquier ser vivo con los bifenilos policlorados. Se definieron acciones que pudieran ejecutarse con la menor cantidad de recursos posibles, de manera que se pudiera almacenar los transformadores durante el tiempo que se necesitaba para poner en marcha el proceso de declorinación.

Con la evaluación del transporte de materiales peligrosos, se definieron los principales riesgos de cada sustancia, a razón de las propiedades establecidas en sus hojas de seguridad. Gracias a lo anterior se pudieron establecer procedimientos y normas de seguridad para un transporte adecuado de las sustancias. En general se obtuvieron recomendaciones para la empresa encargada del proceso, de manera que utilizando los recursos a su disposición se pudieran disminuir los riesgos lo mejor posible. Se establecieron las características de los medios de transporte y las mejores rutas de paso según la tramitología asociada.

Con el estudio del tratamiento y disposición final de los residuos generados durante el proceso de declorinación, se caracterizaron y cuantificaron todas las sustancias asociadas con este subproceso. Se establecieron los procedimientos que tiene establecidos la empresa para lidiar con los residuos, y finalmente se elaboraron alternativas de menor costo y tiempo requerido. Los sistemas diseñados requieren de construcción de equipos e investigaciones de campo posteriores, pero implican la disminución del transporte de materiales peligrosos y el ahorro tanto en tramitología como en tiempo y dinero.

Realizando el análisis de impacto ambiental, se logró un conocimiento mejorado sobre los peligros asociados al proceso de declorinación en materia de contaminación ambiental y eco-toxicidad. Se lograron establecer medidas de mitigación del daño y acciones que pudieran reducir la probabilidad del riesgo hasta valores aceptables de operatividad. Con lo anterior se espera que la obtención de la viabilidad ambiental por parte de la SETENA sea un proceso de relativa sencillez, y que durante el

proceso de decoloración no se generen impactos de carácter ambiental en los alrededores de la empresa que lo realiza.

El estudio de riesgo permitió analizar la peligrosidad del proceso de decoloración desde un punto de vista de salud ocupacional. Se analizó el riesgo tanto para la salud de los trabajadores como para la empresa en términos económicos. Con lo anterior se obtuvieron medidas de mitigación y recomendaciones que permitieran un ambiente laboral adecuado, además de disminuir la probabilidad de un daño hasta valores aceptables según las normas de salud ocupacional del país. La información obtenida permitirá el establecimiento de las bases de un plan de emergencias para la empresa.

En general la realización de la práctica dirigida permitió la obtención de gran cantidad de conocimiento para su realizador en temas variados sobre la puesta en marcha de un proceso en Costa Rica. Aunque la información obtenida fue de carácter general, permite que se pueda ahondar en cada tema con una mayor facilidad, a medida que los proyectos más adelante lo ameriten. Se espera que los beneficios obtenidos hayan formado un profesional adecuado para el ámbito laboral del país y permitan un desenvolvimiento adecuado en el campo de la ingeniería química.

A fin de complementar los beneficios obtenidos por la realización del análisis técnico, se generaron las siguientes recomendaciones generales para el estudio:

- Se recomienda la realización de un análisis básico de costos, de manera que se pueda comparar la compra de aceite dieléctrico nuevo con el procesamiento y regeneración del aceite dieléctrico usado.
- Es imperativo realizar una revisión de la información y los análisis establecidos en este trabajo luego de poner en marcha el proceso, de manera que se puedan corroborar las suposiciones y ahondar en los aspectos de mayor importancia de las operaciones unitarias a realizar.
- Se recomienda establecer una comunicación continua con las instituciones del Estado relacionadas al proyecto (MINAE, Ministerio de Salud, entre otras) de manera que se aúnen esfuerzos en beneficio del cumplimiento de los convenios internacionales. Es importante que se apoyen los proyectos similares y se brinden los recursos a su disposición de manera que se puedan tratar todos los aceites contaminados en existencia dentro del país.

NOMENCLATURA

A	Constante empírica de altura total, mm
AC	Acumulación, adim.
B	Constante empírica de altura sin borne, mm
C	Constante empírica de ancho uno, mm
C	Concentración, Mol/l
Cp	Capacidad calorífica, kJ/kg K
D	Constante empírica de ancho dos, mm
D	Diámetro, m
E	Tasa de evaporación, mm/día
EX	Extensión, adim.
H	Humedad, %
I	Importancia, adim.
IN	Intensidad, adim.
MC	Recuperabilidad, adim.
MO	Momento, adim.
N	Número, adim.
NA	Naturaleza, adim.
P	Presión, kPa
PE	Persistencia
PR	Periodicidad, adim.
Pw	Potencia, kW
Q	Flujo volumétrico, m ³ /s
\dot{Q}	Flujo de calor, kW
R	Radiación solar, MJ/m ² día
RV	Reversibilidad, adim.
Re	Número de Reynolds, adim.
T	Temperatura, °C
U	Velocidad, m/s
V	Volumen, m ³
a	Coefficiente de actividad, adim.
e	Presión de vapor, kPa
f	Función de velocidad, m/s
m	Masa, kg
n	Velocidad de agitación, s ⁻¹
z	Altura, m
Δ	Gradiente de la curva presión-temperatura, kPa/°C
α	Albedo, adim.
γ	Constante psicométrica, kPa/°C
δ	Declinación del sol, radianes
λ	Calor latente de evaporación, KJ
μ	Viscosidad, kg/ms
ρ	Densidad, kg/m ³
σ	Constante de Stefan-Boltzmann, MJ/K ⁴ m ² día
ϕ	Función de potencia, adim.
φ	Latitud, radianes
ω	Ángulo horario del atardecer, radianes

Subíndices

Cl	Referente al cloro
PCB	Se refiere a bifenilos policlorados
Q	Referente a flujo
R	Referente a reactor
T	Se refiere a total
a	Referente al agitador mecánico
ac	Referente al aceite
ef	Se refiere a efectiva
max	Se refiere a máximo
min	Se refiere a mínimo
n	Referente a concentración
neta	Referente a neta
nl	Referente a onda larga
real	Se refiere a real
s	Se refiere a saturación
sd	Referente a solar diaria
(u)	Referente a velocidad
w	Referente al agua
x	Referente a relativo

BIBLIOGRAFÍA

- Agency for Toxic Substances and Disease Registry. (1 de Noviembre de 2011). *ASTDR*. Recuperado el 28 de Setiembre de 2014, de <http://www.atsdr.cdc.gov/toxprofiles/tp85-c2.pdf>
- Aguirre, J., & Lopera, E. (2006). *Purificación de aceites aislantes contaminados con bifenilos policlorados (PCB's)*. Medellín: Universidad Nacional de Colombia.
- Ahmadzadeh, T., Pejman, A., Mahin Abdollahzadeh, E., Ahmadzadeh, B., & Nazariha, M. (2011). Evaluation of salt effects on some thermodynamic properties of Urmia Lake water. *International Journal of Environmental Research*, 343-348.
- Air Sea Containers . (11 de Noviembre de 2005). *Carepack*. Recuperado el 19 de Octubre de 2014, de http://www.carepack.nl/fileadmin/user_upload/carepack.nl/downloads/AS_Steel_Drums.PDF
- Akridge, G. (2007). Methods for calculating brine evaporation rates during salt production. *Journal of Archaeological Science*, 1453-1462.
- Alfaro, A. (2014). *Comunicación personal*. San Pedro.
- Alfaro, C. (2008). *resumen de inventario de COP's: PCB's, plaguicidas, dioxinas y furanos*. San José: Dirección de Gestión de Calidad Ambiental.
- Allen Filters. (2009). *Allen Filters*. Recuperado el 9 de Setiembre de 2014, de http://cdn2.hubspot.net/hub/272197/file-251812186-pdf/white_papers/afi-wp-transoil1.pdf
- Allen, L. (2013). *Remington: And introduction to Pharmacy*. Michigan: Pharmaceutical Press.
- American Institute of Chemical Engineers. (1992). *Guidelines for hazard evaluation procedures*. New York: Library of Congress.
- American Institute of Chemical Engineers. (1998). *Guidelines for safe warehousing of chemicals* . New York: Center for Chemical Process Safety.
- Applied Research Institute For Prospective Technologies. (2007). *Protechnology*. Recuperado el 4 de Setiembre de 2014, de <http://www.protechnology.lt/studies/PT-WP-06-2008.pdf>
- Argonne National Laboratory. (26 de Agosto de 2010). The Greenhouse gases, Regulated Emissions, and Energy Use in Transportation Model. *Biomass Energy Data Book*. Argonne, Illinois, United States: U.S Department of Energy.
- Armstrong, J. (2012). *General, Organic, and Biochemistry: An applied approach*. Stamford: Cengage Learning.
- Arora, A. (2006). *Aromatic Organic Chemistry*. New Delhi: Discovery Publishing House.
- Barquero, M. (2012). *Hoja de seguridad de productos peligrosos: Aceite dieléctrico contaminado con bifenilos policlorados*. San José: La Compañía.
- Barquero, M. (2014). *Comunicación personal*. San José.
- Bartnikas, R. (2000). Dielectrics and insulators. En R. Dorf, *The electrical engineering handbook*. Boca Raton: CRC Press.
- Batres, R., Takashi, S., Shimada, Y., & Tetsuo, F. (2008). *A graphical approach for hazard identification*. Lyon: Elsevier.
- Beltrán, Ó., Berrío, L., Agudelo, E., & Cardona, S. (2013). Tecnologías de tratamiento para la Tierra Fuller contaminada con aceite dieléctrico. *EIA*, 33-48.

- Bondet, V., Brand-Williams, W., & Berset, C. (1997). Kinetics and mechanics of antioxidant activity using DPPH* free radical method. *Food, Science & Technology*, 609-615.
- Bors, A., & Meghea, A. (2006). *determination of polychlorinated biphenyl compounds through gas chromatography coupled with mass spectrometry method* . Bucharest: Universidad politécnica de Bucharest.
- British Geological Survey. (2006). *Fuller's Earth*. Woburn: Office of the Deputy Prime Minister .
- Bruce, R. (2012). Yamaguchi, Elaine; Bhalla, Gaurav; Gatto, Vincent. En R. Bruce, *Handbook of lubrication and tribology* (págs. 21.1-21.24). Boca Raton: CRC Press.
- Budget Truck Rental. (2014). *Budget Truck*. Recuperado el 14 de Octubre de 2014, de <https://www.budgettruck.com/4300.aspx>
- Burke, R. (2003). *Hazardous Materials Chemistry for Emergency Responders*. Boca Raton: Lewis Publishers.
- Carretero, A. (2007). *Aspectos ambientales. Identificación y evaluación*. Madrid: Asociación española de normalización y certificación.
- Carson, P., & Mumford, C. (2002). *Hazardous Chemicals Handbook*. Oxford: Butterworth-Heinemann.
- CERI-ACDI-Colombia, P. (2001). *Manual de manejo de PCB's para Colombia*. Bogotá: Ministerio del medio ambiente de Bogotá, Colombia.
- Chacón, G. (8 de Mayo de 2012). propiedades del agua líquida saturada. *Apuntes de clase sobre fenómenos de transporte, cantidad de movimiento, calor y masa*. San Pedro, San José, Costa Rica: Universidad de Costa Rica.
- Chauhan, B. (2013). *Engineering chemistry*. New Delhi: Laxmi Publications.
- Chemical Book. (2007). *Chemical Book*. Recuperado el 18 de Diciembre de 2014, de http://www.chemicalbook.com/ChemicalProductProperty_US_CB0298430.aspx
- Chevron Texaco Global Lubricants. (2002). *Transformer oil material safety data sheet*. San Ramon: Chevron Texaco Global Lubricants.
- Clean Harbors. (2013). *Cleanharbors*. Recuperado el 12 de Agosto de 2014, de http://www.cleanharbors.com/browse_by_service/waste_disposal_and_recycling/pcb_disposal.html
- Colegio de Ingenieros Químicos y Profesionales Afines . (2010). *Recopilación de legislación, Reglamentos, guías, diagramas y planos*. San José: CIQPA.
- Colegio de Ingenieros Químicos y Profesionales afines. (2004). *Ley Orgánica del Colegio de Ingenieros Químicos y Profesionales Afines de Costa Rica*. San José: La Gaceta de Costa Rica.
- Corporation, E. (2004). *Enervac*. Recuperado el 27 de Noviembre de 2014, de <http://www.enervac.com/Portuguese/04-e575a.shtml>
- Departamento de Gestión Empresarial en Salud Ocupacional del INS. (2012). *Evaluación de riesgos laborales*. San José: Instituto Nacional de Seguros.
- Departamento de Seguridad Industrial del ICE. (2005). *Norma para la identificación, análisis y evaluación de riesgos laborales* . San José: Instituto Costarricense de Electricidad.
- Dirección General de Ingeniería de Tránsito. (2011). *Ruta de paso para materiales peligrosos* . San José: Ministerio de Obras Públicas y Transportes.
- Ebbing, D., & Gammon, S. (2009). *General chemistry: Enhanced edition*. Belmont: Cengage Learning.
- Eisler. (2012). *Handbook of chemical risk assessment: Health hazards to humans, plants and animals* . Boca Raton: Lewis Publishers.

- Eisler, R. (2000). *Handbook of Chemical Risk Assessment*. Laurel: Lewis.
- ENERVAC Corporation. (2013). *Enervac*. Recuperado el 09 de Agosto de 2014, de <http://www.enervac.com/en/PDFs/Digest.pdf>
- Erham, S., Adhvaryu, A., & Sharma, B. (2005). Chemically functionalized vegetable oils. En L. Rudnick, *Synthetics, mineral oils, and bio-based lubricants: Chemistry and technology*. Boca Raton: Taylor & Francis Group.
- European Directorate for the Quality of Medicines and Healthcare. (2004). *The European pharmacopoeia*. Strasbourg: Council of Europe.
- Facultad de Química de la Universidad Nacional Autónoma de México. (4 de Abril de 2008). *Facultad de Química*. Recuperado el 5 de Noviembre de 2014, de <http://www.quimica.unam.mx/IMG/pdf/10sodio.pdf>
- Ferraro, V., Cruz, I., Ferreira, R., Pintado, M., & Castro, P. (2011). Solvent extraction of sodium chloride from codfish (*Gadus Morhua*) salting processing wastewater. *Desalination*, 42-48.
- Ferrie, J., Braun, J.-M., & John, H. (1982). *Patente n° 0099951*. Ontario.
- Fessenden, R., & Fessenden, J. (1983). *Química Orgánica*. Belmont: Wadsworth Internacional Iberoamérica.
- Fluid Environmental Services. (22 de Junio de 2008). *Fluid Environmental*. Recuperado el 9 de Setiembre de 2014, de <http://www.fluidenvironmental.com/oilgator.html>
- Fondo Nacional de Financiamiento Forestal. (2014). *FONAFIFO*. Recuperado el 11 de Diciembre de 2014, de <http://www.fonafifo.go.cr/psa/index.html>
- García, J., & Prado, J. C. (2008). Los envases y embalajes como fuentes de ventajas competitivas. *Universia Business Review*, 64-79.
- García, L. A. (2007). *Aplicación del análisis multicriterio en la evaluación de impactos ambientales*. Barcelona: Universidad Politécnica de Cataluña.
- García-Regueiro, J., & Castellari, M. (2009). *Polychlorinated biphenyls: Environmental Chemical Contaminants in muscle Food*. Madrid: Taylor and Francis Group.
- Gary, J., & Handwerk, G. (2001). *Petroleum Refining*. New York: Marcel Dekker.
- Gator Canada. (2014). *Canadian Environmental*. Recuperado el 8 de Setiembre de 2014, de http://www.canadianenvironmental.com/marketplace/marketplace_detail.cfm?RecordID=1602
- Georgiev, A., Karamancheva, I., & Topalova, L. (2007). Determination of oxidation products in transformer oils using. *Journal of molecular structure*, 18-23.
- Georgiev, A., Karamancheva, I., & Topalova, L. (2007). Determination of oxidation products in transformer oils using FT-IR spectroscopy. *Journal of molecular structure*, 18-23.
- Gilbert, J., & Stephen, m. (2011). *Experimental Organic Chemistry: A miniscale and microscale Approach*. Boston: Cengage Learning.
- Gill, P. (2008). *Electrical power equipment maintenance and testing*. Boca Raton: CRC Press.
- Guide Chem. (2012). *Guidechem*. Recuperado el 16 de Diciembre de 2012, de <http://www.guidechem.com/dictionary/en/540-09-0.html>
- Gupta, C., & Mukherjee, T. (2000). *Hydrometallurgy in extraction processes*. Boca Raton: CRC Press.
- Harlow, J. (2012). *Electric power transformer engineering*. Boca raton: CRC Press.
- Heathcote, M. (2007). *J & P Transformer book*. Oxford: Elsevier.
- Heinrich, K., Pacheco, R., Solera, M., & Alfaro, M. (2013). *Series de brillo solar en Costa Rica*. San José: Ministerio de Ambiente y Energía.

- Hernández, L. (2014). *Comunicación personal*. San Pedro .
- Hodgson, P. (2010). *PCB Waste*. Brantford: Redragon .
- Holma, J., & Stone, P. (2001). *Chemistry*. Cheltenham: Nelson Thornes.
- Hübschmann, H. (2009). *handbook of GC/MS: Fundamentals and Applications*. Weinheim: Wiley-VCHVerlag GmbH & Co.
- Hunt, M., Herron, E., & Green, L. (2012). *Chlorides in fresh water*. Kingston: URI Watershed Watch.
- Hyatt, N. (2003). *Guidelines for Process Hazards Analysis (PHA, HAZOP), hazards Identification, and Risk Analysis*. DYADEM.
- Instituto Meteorológico Nacional. (2014). *IMN estación ITCR*. Recuperado el 10 de Diciembre de 2014, de <http://www.imn.ac.cr/especial/estacionitcr.html>
- International Programme of Chemical Safety. (5 de Abril de 2010). *INCHEM*. Recuperado el 10 de Marzo de 2014, de INCHEM: <http://www.inchem.org/documents/icsc/icsc/eics0360.htm>
- Karassik, I. (1989). *Centrifugal pump clinic*. New York: Marcel Dekker.
- Kinectrics. (2011). *Kinectrics*. Recuperado el 9 de Agosto de 2014, de <http://www.kinectrics.com/Solutions/Pages/PCB-Destruction-Services.aspx>
- Klasson, K. (2000). *Development of an In-Well/Oil/Water separator (Centrifugal Downhole Separator)*. Oak Ridge: Oak Ridge National Laboratory.
- Kobelco. (2007). *Kobelco Eco-Solutions Company*. Recuperado el 12 de Agosto de 2014, de http://www.kobelco-eco.co.jp/english/disposal/pcb/pcb_001.html
- Lemus, J., Martín, M., Palomar, J., Gómez, L., Gilarranz, M., & Rodríguez, J. (2012). Removal of chlorinated organic volatile compounds by gas phase adsorption with activated carbon. *Chemical Engineering Journal*, 246-254.
- Lewand, L. (2002). *The role of corrosive sulphur in transformers and transformer oil* . Watertown: Doble Engineering Company.
- Lewandoski, J. (2003). Historic american roof trusses. *Timber Framing*, 4-17.
- Lewis, R. (1998). *Lewis Dictionary of Toxicology*. Boca Raton: CRC Press.
- (2006). *Ley N° 8538*. San José: La Gaceta.
- Lodge, J. (1988). *Methods of air sampling and analysis*. Boca Raton: Lewis Publishers.
- Machinery zone. (12 de Mayo de 2014). *Machineryzone*. Recuperado el 27 de Mayo de 2014, de <http://www.machineryzone.eu/used/truck-forklift/4598367/kalmar-dce320.html>
- Mackay, D., Wan Ying, S., & Kuo-Ching, M. (2006). *Physical-Chemical properties and environmental fate for organic chemicals*. Boca Raton: Taylor and Francis Group.
- Mahmoudkhani, M., & Keith, D. (2009). Low-energy sodium hidroxide recovery for carbon dioxide capture from atmospheric air-Thermodynamic analysis. *International Journal of Greenhouse Gas Control* , 376-384.
- Mangialardi, T., & Paolini, A. (1990). Adsorption of quaternary ammonium surfactants on Fuller's Earth. *Water, Earth & Soil Pollution*, 139-150.
- Melber, C., Kielhorn, J., & Mangelsdorf, I. (2004). *Coal tar creosote*. Ginebra: World Health Organization.
- Meshkatoddini, M. (2008). *Aging study and lifetime estimation of transformer mineral oil* . Tehran: Science Publications.
- Michalica, P., Kazatchkov, I., Stastna, J., & Zanzotto, L. (2008). Relationship between chemical and rheological properties of two asphalts of different origins. *Fuel*, 3247-3253.

- Ming-Ho, Y. (2001). *Environmental Toxicology: Impacts of environmental toxicants on living systems*. Boca Raton: Lewis Publishers .
- Ministerio de Ambiente, Energía y Telecomunicaciones. (2009). *Plan nacional de implementación del Convenio de Estocolmo para la gestión de Contaminantes orgánicos persistentes en Costa Rica*. San José.
- Ministerio de Economía, Industria y Comercio. (2012). *MEIC*. Recuperado el 21 de Enero de 2105, de datos.meic.go.cr/datastreams/74823/aceite-manteca-margarina-sal-y-azucar-precio-minimo-maximo-promedio/
- Ministerio de Salud. (2013). *Ministerio de Salud*. Recuperado el 19 de Mayo de 2014, de http://www.ministeriodesalud.go.cr/index.php/tramites/autorizaciones-y-certificaciones/cat_view/453-tramites/542-autorizaciones-y-certificaciones/543-desechos-peligrosos
- Miyahara, S., Ishikawa, H., & Yoshizawa, Y. (2011). Experimental investigation of reaction behaviour between carbon dioxide and liquid sodium. *Nuclear engineering and design*, 1319-1318.
- Mora, B. (2014). *Comunicación Personal*. San Pedro.
- Morcos, M., Jeffrey, T., & Parsinejad, F. (2012). *Patente n° 508.206*. California.
- Moreda, W., Pérez, M., & Cert, A. (2004). Analysis of neutral lipids: Unsaponifiable. En L. Nollet, *Handbook of food analysis* (págs. 313-348). New York: Marcel Dekker.
- Murilo, F., Luna, T., Rocha, S., Rola, M., Albuquerque, M., Azevedo, D., y otros. (2011). Assessment of biodegradability and oxidation stability of mineral, vegetable and synthetic oil samples. *Industrial crops and products*, 579-583.
- Naciones Unidas. (2011). *Formulación de recomendaciones sobre las enmiendas de las Instrucciones Técnicas para el transporte sin riesgos de mercancías peligrosas por vía aérea*. Ginebra: Publicación de las Naciones Unidas.
- Naidu, A. (2000). *Natural Food Antimicrobial Systems*. Boca Raton: CRC Press.
- Nath, D. (1996). Adsorption of polyacrylic acids and their sodium salts on hydroxyapatite: Effect of relative molar mass. *Journal of Colloids and Interface Science*, 289-296.
- Niessen, W. (2001). *Current Practice of Gas Chromatography-Mass Spectrometry*. New York: Marcel Dekker.
- Office Of Air Quality Planning And Standards. (1995). *Compilation of air pollutant emission factors*. Durham: U.S Environmenatl Protection Agency.
- Oficina de planeación de la PGN. (2013). *Mapa de riesgos institucional*. Bogotá: Procuraduría General de la Nación de Colombia.
- Organic Materials Review Institute . (2002). *Butylated Hydroxytoluene (BHT) crops*. Washington: United States Department of Agriculture.
- Overseas Development Institute. (16 de Abril de 2013). *ODI*. Recuperado el 30 de Setiembre de 2014, de <http://www.odi.org/sites/odi.org.uk/files/odi-assets/publications-opinion-files/6082.pdf>
- Panel on Food Additives and Nutrient Sources added to Food. (2012). *Scientific opinion on the re-evaluation of butylated hydroxytoluene BHT (E 321) as a food additive*. Parma: European Food Safety Authority.
- Pansini, A. (1999). *Electrical transformers and power equipment*. lilburn: Fairmont Press.
- Penney, D. (2000). *Carbon monoxide toxicity*. Boca Raton: CRC Press.
- Perry, R., & Green, D. (2008). *Perry's Chemical Engineers Handbook Octava Edición*. Kansas: McGraw Hill.

- Pfafflin, J., & Ziegler, E. (2006). *Enciclopedia of Enviromental Science and Engineering*. United Kingdom: Taylor and Francis Group.
- Pickering, A., & Cowley, S. (2010). Risk Matrices: implied accuracy and false asumptions. *Journal of Health & Safety Research & Practice*, 9-16.
- PNUMA Productos Químicos. (2002). *Transformadores y condensadores con PCB: desde la gestión hasta la reclasificación y eliminación*. Ginebra: UNEP.
- Pradhan, S. (2011). *Production and characterization of Activated Carbon produced from a suitable industrial sludge*. Rourkela: National Institute of Technology .
- Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente. (2011). Convenio de Basilea sobre el control de los movimientos transfronterizos de los desechos peligrosos y su eliminación. *Convenio de Basilea* (págs. 5-11). Basilea: PNUMA.
- Proyecto CERI-ACDI-Colombia. (2001). *Manual de manejo de PCB's para Colombia*. Bogotá.
- Redragon. (2013). *Redragon*. Recuperado el 1 de Setiembre de 2013, de <http://www.redragon.ca/Pages/products/tors.pdf>
- Redragon S.A. (2010). *High Vacuum Degasifier series*. Ontario: Redragon.
- Redragon S.A. (2010). *TORS series-Transformer Oil Regeneration System*. Ontario: Redragon.
- (2010). *Reglamento 24715 para el transporte de Productos Peligrosos* . San José: La Gaceta.
- (1998). *Reglamento 27001 para el manejo de los desechos peligrosos industriales*. San José: La Gaceta.
- (1998). *Reglamento 27378-S sobre Rellenos Sanitarios*. San José: La Gaceta.
- (2007). *Reglamento de vertido y reuso de aguas residuales* . San José: La Gaceta.
- Rivera, E. (2002). *Procesos y Operaciones Integradas IQ-526: Material del curso* . San Pedro: Universidad de Costa Rica.
- Rivera, E. (2010). *Apuntes de agitación y mezclado*. San Pedro: Universidad de Costa Rica.
- Rohm and Haas. (2007). *DOW* . Recuperado el 16 de Agosto de 2014, de http://www.dow.com/assets/attachments/business/process_chemicals/coupling_precursors/sodium_hydride_60_percent_in_oil/tds/sodium_hydride_60_percent_in_oil.pdf
- Román, I. (2013). *Petroleum Hydrocarbon Analysis*. Boca Raton: CRC Press.
- Roy, A., Eaton, H., Cartledge, F., & Tittlebaum, M. (1992). Solidification/Estabilization of hazardous waste: Evidence of physical encapsulation. *Environmental Science Technology* , 1349-1353.
- Royal Society of Chemistry. (2014). *Chemspider*. Recuperado el 10 de Noviembre de 2014, de <http://www.chemspider.com>
- Royal Society of Chemistry. (2014). *Chemspider*. Recuperado el 11 de Noviembre de 2014, de <http://www.chemspider.com/Chemical-Structure.34668.html>
- Rudnick, L. (2009). *Lubricant additives: Chemistry and Applications* . Boca Raton: CRC Press.
- Sanz, J. (2013). *Química: equilibrios químicos, teoría, ejercicios resueltos y prácticas*. Madrid: Visión Libros.
- Sea Marconi. (2011). *Gestión de aparatos y aceites contaminados con PCB's*. Buenos Aires: Cámara Empresaria del Medio Ambiente.
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (2005). *Norma Oficial Mexicana sobre el procedimiento de identificación, clasificación y los listados de residuos peligrosos*. Distrito Federal: Diario Oficial.
- Seinfeld, J., & Pandis, S. (2012). *Atmospheric Chemistry and Physics: From air pollution to climate change*. Hoboken: John & Wiley Sons.

- Shanshool, J., Al-Sammerrai, D., & Allavi, I. (1990). Relationship between water adsorbed on a Na-montmorillonite and its efficiency in removing oxidation products from lubricating oils. *Applied Clay Science*, 271-276.
- Siemens. (2011). *Repair and retrofit-New life to aged transformers*. Erlangen: Siemens AG.
- Sigma Aldrich. (30 de Julio de 2013). *Sigma Aldrich*. Recuperado el 5 de Noviembre de 2014, de <http://www.sigmaaldrich.com>
- Sigma Aldrich. (2014). *Sigma Aldrich*. Recuperado el 14 de Marzo de 2014, de www.sigmaaldrich.com
- Sigma-Aldrich. (2014). *Sigma Aldrich*. Recuperado el 10 de Noviembre de 2014, de <http://www.sigmaaldrich.com>
- Sigma-Aldrich. (2014). *Sigma Aldrich*. Recuperado el 24 de Diciembre de 2014, de www.Sigma-Aldrich.com
- Sigma-Aldrich. (s.f.). *Sigma-Aldrich*. Recuperado el 19 de Agosto de 2014, de www.sigmaaldrich.com
- Simon, N., Latgé, C., & Gicquel, L. (2007). *Investigation of sodium-carbon dioxide interactions with calorimetric studies*. Nice: Institut national des sciences appliquées de Rouen.
- Sinkkonen, S., & Paasivirta, J. (2000). Degradation half-life times of PCDD's, PCDF's and PCB's for environmental fate modeling. *Chemosphere*, 943-949.
- Syamal, A. (2008). *Living Science Chemistry*. Delhi: Ratna Sagar.
- TEXACO. (31 de 10 de 2002). texaco transformer oil. *Material Safety Data Sheet*. San Ramon, California, United States.
- The Gold Standard. (15 de Septiembre de 2012). *The Gold Standard*. Recuperado el 30 de Septiembre de 2014, de <http://www.goldstandard.org/wp-content/uploads/2012/09/Offset-Handbook-lo-res.pdf>
- TIGG Corporations. (14 de Diciembre de 2014). *TIGG*. Recuperado el 19 de Diciembre de 2014, de http://www.tigg.com/PDF/TIGG_OMC-P.pdf
- Transoil Services. (2012). *Transoil Services*. Recuperado el 9 de Agosto de 2014, de <http://www.transoilservices.co.za/products.files/TECHNICAL%20SPECS%20REGENERATION%20PLANT.pdf>
- U.S Department of Energy. (2012). *Large Power Transformers and the U.S Electric Grid*. Office of Electricity Delivery and Energy Reliability.
- U.S. Department of transportation. (2012). *Pipeline and Hazardous Materials Safety Administration*. Recuperado el 2 de Febrero de 2014, de <http://www.phmsa.dot.gov/hazmat>
- Ulate, A. (2014). *Comunicación personal*. San Pedro.
- Unidad de análisis administrativos. (2013). *Permiso de Pesos y Dimensiones*. San José: Departamento de Pesos y Dimensiones del CONAVI.
- United Nations Economic Commission for Europe. (s.f.). *UNECE*. Recuperado el 4 de Agosto de 2014, de <http://www.unece.org/index.php?id=33193>
- Universidad de Costa Rica. (2009). *Kioscos ambientales*. Recuperado el 12 de Enero de 2015, de http://kioscosambientales.ucr.ac.cr/index.php?option=com_content&view=article&id=700:juicio-crucitas-texto-de-la-sentencia-contra-el-estado-de-costa-rica-y-transnacional-infinito-gold&catid=40:noticias-ambientales&Itemid=60
- Vijgen, J., & McDowall, R. (2008). *POPs Technology Specification and Data Sheet*. Auckland: Secretariat of Basel Convention.

- Villafañe-Deyack, E., & Laboy-Nieves, E. (2010). degradation of PCBs and spilled oil by bioenhancing agents. En E. Laboy-Nieves, M. Goosen, & E. Emmanuel, *Environmental and human health-Risk management in developing countries* (págs. 185-200). London: Taylo and francis Group.
- Weber, M. (2003). *Handbook of optical materials*. Boca Raton: CRC Press.
- Wes, J., Olsen, L., & Sweeney, M. (2004). *Asphalt (bitumen)*. Ginebra: World Health Organization.
- Yalkowsky, S., He, Y., & Jain, P. (2010). *Handbook of aqueous solubility data*. Boca Raton: Taylor and Francis Group.
- Yurkanis, P. (2004). *Organic Chemistry*. California: Prentice Hall.
- Zamora, R., & Hidalgo, F. (2004). Fatty Acids. En L. Nollet, *Handbook of food analysis* (págs. 221-274). New York: Marcel Dekker Inc.
- Zeta Gas. (15 de Enero de 2015). *Grupo Zeta*. Recuperado el 15 de Enero de 2015, de <http://www.grupozeta.co.cr/>

ANEXO 1

D1 del proyecto en estudio

21-11602-13



23 OCT 2013

000

1. INFORMACIÓN GENERAL
1.1. Datos Generales

Información general de la actividad, obra o proyecto											
1	NOMBRE DE LA ACTIVIDAD, OBRA O PROYECTO			2	NOMBRE O RAZÓN SOCIAL DEL PROPIETARIO (PERSONA FÍSICA O JURÍDICA)			3	DOCUMENTO DE IDENTIDAD		
1				Tratamiento, regeneración y recuperación de aceite dieléctrico contaminado con PCB							
4	DOMICILIO SOCIAL O DIRECCIÓN EXACTA CALLE AVENIDA NOMBRE O NÚMERO				5	OTRAS SEÑAS					
4				Carretera Interamericana Sur							
6	TELEFONO N°		7	FAX N° (para recibir notificaciones)		8	APARTADO Y CÓDIGO OF. POSTAL		9	CORREO ELECTRÓNICO (cuando cuente con uno)	
6				7		8		9			
3											
XXXX											
Sobre la localización administrativa y geográfica de la actividad, obra o proyecto											
10	PROVINCIA		11	CANTÓN		12	DISTRITO		13	OTRAS SEÑAS (N° Plano / coordenadas/N° finca folio real / Dirección exacta)	
	No.	Nombre		No.	Nombre		No.	Nombre			
3	Carlago		1	Central		6	Guadalupe				
Información y calidades del representante legal											
14	APELLIDOS Y NOMBRE REPRESENTANTE LEGAL				15	ESTADO CIVIL			16	PROFESIÓN / OFICIO	
14				15			16				
17	DOMICILIO					18	DOCUMENTO Y NÚMERO DE IDENTIDAD				
17					18						
19	TELEFONO N°		20	FAX N° (obligatorio)		21	APARTADO Y CÓDIGO OF. POSTAL		22	CORREO ELECTRÓNICO (cuando cuente con uno)	
19		20		21		22		22			
19				21		22		22			
XXXX											
Información sobre la actividad, obra o proyecto											
23	NÚMERO CIU		24	Clasificación según IAP		25	Nombre del Consultor Ambiental responsable		26	Número de registro ante la SETENA	
23		24		25		26		27		27	
3720		B2						Número de Teléfono		VICENTE HASTA	
										26/06/15	
										Por Resolución No.	
										N° 1570-2013-SETENA	
28	RESUMEN DEL PROYECTO (de conformidad con la ficha de descripción del proyecto que se encuentra en la guía de llenado, del anexo 2)										
28											
El proyecto consiste en la instalación y operación de un equipo importado para el tratamiento, regeneración y recuperación de aceite dieléctrico con Bifenilo Policlorado (PCB), por medio de un proceso de dechlorinación química, descontaminación, recategorización y recuperación de transformadores de distribución y potencia, que hasta la fecha se mantienen almacenados por los operadores eléctricos respectivos.											

1.2. Firmas de declaración jurada

Los aquí firmantes, declaramos bajo fe de juramento, que toda la información suministrada y que consta en este formulario es verídica, y actual y es brindada de acuerdo al conocimiento técnico disponible. Lo anterior bajo las penas que la Ley establece para el delito de perjurio y falso testimonio y concientes de la siguiente Cláusula de Responsabilidad Ambiental:

"El consultor ambiental y el desarrollador que firman el Documento D - 1 serán los responsables directos de la información técnica científica que aportan en el mismo. En virtud de ello, la Secretaría Técnica Nacional Ambiental (SETENA), como autoridad ambiental del Estado costarricense, fiscalizará que el documento que se presente haya cumplido con los lineamientos técnicos establecidos mediante la guía de llenado y si estos se cumplen aceptará la información presentada como cierta y verídica, a modo de declaración jurada. Sobre la base de los datos aportados la SETENA podría estar tomando decisiones referentes a la Viabilidad Ambiental de la actividad, obra o proyecto planteado, de modo que en el caso de que se aportara información falsa o errónea, los firmantes no solo serán responsables por esta falta, sino también por las consecuencias de decisión que a partir de esos datos haya incurrido la SETENA".

Nombre del desarrollador, o según sea el caso el del representante legal o apoderado "

Consultor Ambiental responsable "

N° de Consultor Ambiental SETENA

Número de cédula

Número de cédula

N° Carné del Colegio Profesional respectivo

Firma

Firma



000052

1.3. Documentación legal y técnica que debe adjuntarse al D1.

Requisitos legales a presentar junto con este formulario.		Anexo No.
A. En el caso de que el desarrollador sea una persona jurídica		
A.1. Una certificación notarial o registral de la personería jurídica		3
A.2. Una copia de la cédula jurídica vigente.		4
A.3. Una copia de la cédula de identidad, pasaporte u otro documento de identidad del representante legal (para confrontar con su original o copia certificada).		5
B. En el caso de que el desarrollador sea una persona física		
B.1. Una copia de la cédula de identidad, pasaporte u otro documento de identidad (para confrontar con su original o certificada).		
C. Otros documentos a presentar		
C.1. Una certificación notarial o registral de la propiedad.		6
C.2. Una copia certificada del plano catastrado (o bien una copia con el original para confrontar).		7
C.3. Si el desarrollador no es dueño del inmueble, debe presentar la autorización del propietario con la firma autenticada por abogado.		
C.4 Matriz básica de identificación de impactos ambientales acumulativos.		8

Nota: Las certificaciones no deben tener más de 3 meses de emitidas.

1.4. Documentos técnicos complementarios

Documentos técnicos complementarios a presentar junto con este formulario		
A) Diseño de sitio de la actividad, obra o proyecto.		9
B) Hoja cartográfica con la localización del AP (copia a color)		10
C) Estudio de ingeniería básica del terreno del AP, conforme al protocolo que se indica en el Manual de EIA.		
D) Estudio de geología básica del terreno del AP, conforme al protocolo que se indica en el Manual de EIA.		
E) Reporte arqueológico rápido del terreno del AP, conforme al protocolo que se indica en el Manual de EIA.		
F) Certificación sobre el monto de inversión global de la actividad, obra o proyecto aquí planteada, que incluya el monto de las erogaciones por compra de terrenos, construcción de instalaciones, caminos de acceso, obras de electrificación, y agua potable e industrial, compra de maquinaria y equipo, personal calificado y no calificado. Se debe indicar la vida útil del Proyecto y valor de rescate estimado del mismo. No deben incluirse los costos hundidos tales como el estudio de factibilidad. El desglose del monto global de la inversión deberá ser presentado por medio de una declaración jurada, firmada por el profesional correspondiente.		11
G) Registro fotográfico de las condiciones actuales del AP.		12

Estudio Biológico Rápido, conforme al protocolo que se indica en el Manual de EIA

En el caso de los documentos que se indican en los incisos C, D y E, su presentación quedará a discreción del consultor Ambiental. En consecuencia, de no presentarse el estudio respectivo deberá presentarse certificación que indique que no se requiere estudio técnico.

14

1.5. Descripción general de la situación ambiental del sitio donde se desarrollará la actividad, obra o proyecto (la caracterización básica del AP y áreas de influencia)

Caracterización básica actual del área del AP y de influencia del proyecto obra o actividad	A) Área del proyecto y área de influencia directa	A.1. Área de influencia directa del proyecto (AID) en m ²	A.2. Área total del proyecto (Ap) en m ²	A.3. Área neta del proyecto (Apn) en m ²
			45000m ²	1400m ²
B) Identificación del área de influencia directa del proyecto (AID)	B.1. () Dentro del AID existen áreas protegidas hasta un 25% de la superficie total	B.2. () Dentro del AID existen áreas protegidas entre 25 y 50% de la superficie total.		B.3. () Dentro del AID existen áreas protegidas superior al 50% de la superficie total.
	B.4. (x) Dentro del AID existen obras de infraestructura como líneas de transmisión, oleoductos, acueductos, alcantarillados, entre otros.	B.5. () Dentro del AID NO existen obras de infraestructura como líneas de transmisión, oleoductos, acueductos, alcantarillados, entre otros.		
C) Identificación del área total del proyecto (API)	C.1. () Dentro del API más de un 50% de la cobertura vegetal es pasto o charral	C.2. () Dentro del API más de un 50% de la cobertura vegetal es tucelal o cultivo		C.3. () Dentro del API más de un 50% de la cobertura vegetal es bosque
	C.4. (x) Los servicios públicos de agua potable, recolección de desechos y servicio eléctrico, están disponibles y tienen capacidad de carga para soportar la demanda del proyecto.	C.5. () Los servicios públicos de agua potable, recolección de desechos y servicio eléctrico, están disponibles y NO tienen capacidad de carga para soportar la demanda del proyecto		C.6. () Los servicios públicos de agua potable, recolección de desechos y servicio eléctrico, NO están disponibles
	C.7. (x) Los caminos de acceso al AP son de pavimento o asfalto.	C.8. () Los caminos de acceso al AP son de tierra o lastre.		C.9. () No hay caminos de acceso al AP
		C.10. () Existen otras vías de acceso		

¿Cuáles?

1.6. Datos climáticos básicos

Indicar condiciones climáticas promedio anuales en la zona en que ubica el Área de proyecto (según datos meteorológicos recientes)			
Precipitación promedio anual	1573,5 Mm	Temperatura promedio	19,4°C
Velocidad y orientación predominante del viento	10,7 Km/h - E/SE	Meses más lluviosos	Set - Oct
Luz solar	5-6 horas	Meses más secos	Marz - Abril



EVALUACIÓN AMBIENTAL INICIAL 2. CONSUMO / AFECTACIÓN

Nota importante: en caso de la casilla que se este llenando no aplique para la actividad, data o proyecto en analisis se colocara un "0" en la casilla y correspondiente

Componente/ Subcomponente	CASO 1 (Valor = 1)	CASO 2 (Valor = 2)	CASO 3 (Valor = 3)	CASO 4 (Valor = 4)	CASO 5 (Valor = 5)	Y	Marco regulatorio (Z)					Xa Zv	Medidas ambientales Anexo No.	Valoración por efecto
							a	b	c	d	e			
2.1 Agua														
2.1.1 Acueducto público existente	Consumo de agua no supera los 50 m ³ /mes		Consumo de agua entre 50 y 200 m ³ /mes		Consumo de agua mayor a los 200 m ³ /mes	1		3						
2.1.2 Superficial		Consumo de agua no supera el 25% del caudal remanente	Consumo de agua es mayor al 25% y menor al 50% del caudal remanente	Consumo de agua es mayor al 50% y menor al 100% del caudal remanente	Consumo de agua mayor al 100% y menor a 500 m ³ /día	0			2					3.00
2.1.3 Subteranea		Consumo de agua no supera los 50 m ³ /día	Consumo de agua entre 50 y 200 m ³ /día	Consumo de agua mayor a los 200 y menor a 500 m ³ /día	Consumo de agua mayor a los 500 m ³ /día	0			2					
2.2 Modificación de uso	No se produce modificación de uso				Se produce modificación de uso	0		3						0.00
2.3 Abastecimiento														
2.3.1 Autoabastecimiento	2.3.1.1 Bio-combustibles Se generaran menos de 240 MWh/año	Se generaran mas de 240 y menos de 2500 MWh/año	Se generaran mas de 2500 y menos de 5000 MWh/año	Se generaran mas de 5000 y menos de 10000 MWh/año	Se generaran mas de 10000 MWh/año	0		3						0.00
	2.3.1.2 Combustibles Se generaran menos de 240 y mas de 240 MWh/año	Se generaran mas de 240 y menos de 500 MWh/año	Se generaran mas de 500 y menos de 1200 MWh/año	Se generaran mas de 1200 y menos de 2400 MWh/año	Se generaran mas de 2400 MWh/año	0		3						0.00
	Se consumiran menos de 240 MWh/año, o 980 000 litros de combustible por año, o 12 T/año	Se consumiran mas de 240 y menos de 300 000 L y menos de 1800 000 L de combustible por año, o mas de 12 o menos de 60 T/año	Se consumiran mas de 240 y menos de 1200 MWh/año, o mas de 300 000 L y menos de 1800 000 L de combustible por año, o mas de 12 o menos de 60 T/año	Se consumiran mas de 1200 MWh/año, o 1 800 000 L de combustible por año, o de 60 T/año	Se consumiran mas de 1200 MWh/año, o 1 800 000 L de combustible por año, o de 60 T/año	1			2					2.00
2.3.2 Abastecimiento externo														
2.4 Biomas														
2.4.1 Fauna	No hay afectación		Hay afectación			0			2					0.00
2.4.2 Flora	No hay afectación	Si hay afectación de flora pero no eliminación de árboles	Se eliminan árboles aislados en áreas sin cobertura boscosa	Se eliminan parches arbores en sitios menores de 2 ha	El desarrollo de la actividad, obra o proyecto implica la corta de árboles en áreas con cobertura boscosa	0			2					0.00

5.00



3. IMPACTO EN AIRE, AGUA SUELO Y HUMANO

Factor	CASO 1 (Valor = 1)	CASO 2 (Valor = 2)	CASO 3 (Valor = 3)	CASO 4 (Valor = 4)	CASO 5 (Valor = 5)	Y	Marco legal (Z)					X = ZY	Medidas ambientales Anexo No.	Valoración por efecto		
							a	b	c	d	e					
3.1. Aire																
3.1.1 Emisiones																
3.1.1.1 Fuentes fijas.			Hay emisiones controladas		Hay emisiones no controladas	3					2			6.00	15	
3.1.1.2 Fuentes móviles.				Se utilizan equipos móviles		4					3			0.00	16	
3.1.1.3 Radiactores horizontales.					Hay emisiones controladas	0					2			0.00		
3.1.2 Contribución de las emisiones generadas a la contaminación atmosférica con olores, gases y otros efectos.			Las emisiones del proyecto contribuyen a la generación de contaminación atmosférica, pero están controladas		Las emisiones del proyecto contribuyen a la generación de contaminación atmosférica, pero no están controladas	0					2			0.00		18.00
3.1.3 Ruidos y vibraciones.			Hay producción de ruido o vibraciones y la producción total es cercana al límite de la regulación vigente; se puede continuar		Hay producción de ruido o vibraciones y la producción total es cercana al límite de la norma, no es controlable	0				3				0.00		
3.2. Agua																
3.2.1 Aguas de escorrentía superficial.	El aumento del caudal superficial neto es menor a un 10%, referido al área de desfogue	El aumento del caudal superficial neto es mayor al 10% y menor al 25%, referido al área de desfogue	El aumento del caudal superficial neto es mayor al 25% y menor al 50%, referido al área de desfogue	El aumento del caudal superficial neto es mayor al 50%, y menor al 75%, referido al área de desfogue	El aumento del caudal superficial neto es mayor al 75% referido al área de desfogue.	1					2			2.00		
3.2.2 Aguas residuales ordinarias.	Producción de aguas residuales ordinarias y se utilizará una planta de tratamiento o alcantarillado sanitario con planta de tratamiento	Producción de aguas residuales ordinarias y se dispondrán en alcantarillado sanitario con un sistema de tratamiento de probada eficiencia		Producción de aguas residuales ordinarias y se dispondrán en un tanque séptico o similar	Producción de aguas residuales ordinarias y dispondrán en alcantarillado sanitario sin planta de tratamiento	2					2			8.00		10.00
3.2.3 Aguas residuales de tipo especial.	Producción de aguas residuales de tipo especial en cantidad inferior a 50 m ³ /mes		Producción de aguas residuales de tipo especial en cantidad superior a 50 y menor a 200 m ³ /mes		Producción de aguas residuales de tipo especial en cantidad superior a 200 m ³ /mes.	0					2			0.00		
															28,00	



Factor	CASO 1 (Valor = 1)	CASO 2 (Valor = 2)	CASO 3 (Valor = 3)	CASO 4 (Valor = 4)	CASO 5 (Valor = 5)	Macro legal (L)					Me my	Valorado por estado	
						a	b	c	d	e			
3.3 Residuos sólidos													14.00
3.3.1 Residuos sólidos													
3.3.1.1 Ordinarios.		Se clasifica para recuperar, reutilizar, reciclar y su disposición final en un relleno sanitario propio o lugar debidamente autorizado por autoridad competente.	Se clasifica para recuperar, reutilizar, reciclar y su disposición final en un relleno sanitario especializado o lugar debidamente autorizado por autoridad competente.	Se dispone finalmente en un relleno sanitario o lugar debidamente autorizado con clasificación por autoridad competente.	Disposición final en relleno sanitario o lugar debidamente autorizado por autoridad competente.								
3.3.1.2 Especiales.		Se clasifica para recuperar, reutilizar, reciclar y su disposición final en un relleno sanitario propio o lugar debidamente autorizado por autoridad competente.	Se clasifica para recuperar, reutilizar, reciclar y su disposición final en un relleno sanitario especializado o lugar debidamente autorizado por autoridad competente.	Se dispone finalmente en un relleno sanitario o lugar debidamente autorizado con clasificación por autoridad competente.	Disposición final en relleno sanitario o lugar debidamente autorizado por autoridad competente.								
3.3.1.3 Escorias.		Se dispone finalmente en una escombrera dentro del AP o a un terreno en fase concluida, de conformidad con el reglamento de construcciones y el reglamento para el control racional de fraccionamiento y urbanizaciones.		Se clasifica in situ para recuperar, reutilizar y la disposición final se da en un relleno especializado o lugar debidamente autorizado para su tratamiento y disposición final.	Se clasifica in situ para recuperar, reutilizar y la disposición final se da en un relleno especializado o lugar debidamente autorizado para su tratamiento y disposición final.								
3.3.2.1 Químicos.		Se clasifica in situ para recuperar, reutilizar, se trata y la disposición final se da en un relleno propio especializado o lugar debidamente autorizado por autoridad competente.	Se clasifica in situ para recuperar, reutilizar, se trata y la disposición final se da en un relleno especializado o lugar debidamente autorizado (sin tratamiento previo).	Se clasifica para recuperar, reutilizar, se trata y la disposición final en un relleno especializado o lugar debidamente autorizado por autoridad competente.	Se clasifica para recuperar, reutilizar y disposición final en un relleno sanitario o lugar debidamente autorizado para su tratamiento y disposición final.								
3.3.2.2 Radiactivos.		Se clasifica para recuperar, reutilizar, se trata y su disposición final en un relleno propio especializado o lugar debidamente autorizado por autoridad competente.	Se clasifica para recuperar, reutilizar, se trata y su disposición final en un relleno especializado o lugar debidamente autorizado por autoridad competente.	Se clasifica para recuperar, reutilizar, se trata y su disposición final en un relleno especializado o lugar debidamente autorizado por autoridad competente.	Se clasifica para recuperar, reutilizar y disposición final en un relleno sanitario o lugar debidamente autorizado, para su tratamiento y disposición final.								
3.3.2.3 Biológicos.		Se clasifica, se trata y su disposición final en un relleno sanitario especializado o lugar debidamente autorizado por autoridad competente.	Se clasifica, se trata y su disposición final en un relleno sanitario especializado o lugar debidamente autorizado por autoridad competente.	Se clasifica, se trata y su disposición final en un relleno especializado o lugar debidamente autorizado por autoridad competente.	Se clasifica para recuperar, reutilizar y disposición final en un relleno sanitario o lugar debidamente autorizado, para su tratamiento y disposición final.								
3.3.2 Residuos peligrosos													
3.3.3 Momentos de tierra.		Se contempla momentos de tierra y relleno en modificación fuera del área del Proyecto.	Se contempla momentos de tierra con aceros fuera del AP de volúmenes hasta 1,000 m ³ .	Se contempla momentos de tierra con aceros fuera del AP de volúmenes hasta 10,000 m ³ .	Se contempla momentos de tierra con aceros fuera del AP de volúmenes a 10,000 m ³ .								
3.3.4 Pendiente.	El área afectada tiene pendiente entre 0-15%.	El área afectada tiene pendiente entre 15-30%.	El área afectada tiene pendiente entre 30% y 50%.	El área afectada tiene pendiente mayor que 50 y menor que 200 ocupantes por hectárea.	El área afectada tiene pendiente mayor que 60%.								
3.3.5 Densidad de población.	Se espera una densidad máxima menor que 30 ocupantes por hectárea.												
3.3.6 Densidad de construcción.	La cobertura de construcción es menor al 25% de la propiedad del Área Total del Proyecto.	La cobertura de construcción es mayor al 25% pero menor que 50% de la propiedad Área Total del Proyecto.	La cobertura de construcción es mayor que 50% y menor que el 70% de la propiedad Área Total del Proyecto.	La cobertura de construcción es mayor que 70% y menor que 200 ocupantes por hectárea.	La cobertura de construcción es mayor que 200 ocupantes por hectárea.								

14.00



Factor	CASO 1 (Valor = 1)	CASO 2 (Valor = 2)	CASO 3 (Valor = 3)	CASO 4 (Valor = 4)	CASO 5 (Valor = 5)	Y	Marco legal (Z)					X=Zy	Medidas ambientales Anexo No.	Valoración por efecto	
							a	b	c	d	e				
3.4.1 Social	3.4.1.1 Generación de empleo. 3.4.1.2 Movilización, reubicación, traslado de personas del AP.	Genera más de 100 plazas nuevas.	Genera entre 50 a 100 plazas nuevas.	Genera entre 25 a 50 plazas nuevas.	Genera menos de 25 plazas nuevas.	No genera nuevas plazas.	4					2	8,00	17	
		No se produce movilización, traslado, etc. de personas que habitan en el AP, por efecto del proyecto.					Se produce movilización, reubicación, traslado, etc. de personas que habitan en el AP, por efecto del proyecto.	1				3	1,00		
3.4.2 Cultural	3.4.2.1 Paisaje.	Se desarrolla infraestructura en una zona urbana o rural y utiliza una infraestructura preexistente.	Se desarrolla infraestructura en una zona urbana y no provoca un desequilibrio en la textura del paisaje existente.	Se desarrolla infraestructura en una zona rural y no provoca un desequilibrio en la textura del paisaje existente.	Se desarrolla infraestructura en una zona urbana y provoca un desequilibrio en la textura del paisaje existente.	Se desarrolla infraestructura en una zona rural y provoca un desequilibrio en la textura del paisaje existente.	1					3	1,00	24,00	
		El proyecto no afecta al patrimonio científico, arquitectónico o arqueológico.	El proyecto contempla la conservación y el mejoramiento del patrimonio científico, arquitectónico o arqueológico existente en el AP.	El proyecto contempla la conservación del patrimonio científico, arquitectónico o arqueológico existente en el AP.	El proyecto afecta de forma parcial y con autorización el patrimonio científico, arquitectónico o arqueológico existente en el AP.	El proyecto afecta de forma total y con autorización el patrimonio científico, arquitectónico o arqueológico existente en el AP.	1					2	1,00		
3.4.3 Vitalidad		Genera tráfico nuevo en una proporción inferior al 25% de la capacidad vial instalada.		Genera tráfico nuevo en una proporción mayor al 25% y menor al 50% de la capacidad vial instalada.		Genera tráfico nuevo en una proporción mayor al 50% de la capacidad vial instalada.	1					3	1,00		

24,00



Factor	CASO 1 (Valor = 0)	CASO 2 (Valor = 1)	CASO 3 (Valor = 2)	CASO 4 (Valor = 3)	CASO 5 (Valor = 4)	Y	Marco legal (z)					Xe Zy	Medida ambientales Aseso Ho.	Valoración por riesgo
							a	b	c	d	e			
4.1 Manejo de combustible fósil.	No consume, maneja o almacena	Consumo, maneja o almacena una cantidad menor a 5,000 litros al mes	Consumo, maneja o almacena una cantidad mayor a 5,000 y menor a 50,000 litros al mes.	Consumo, maneja o almacena una cantidad mayor a 50,000 y menor a 500,000 litros al mes.	Consumo, maneja o almacena una cantidad mayor a 500,000 litros al mes.	0					2			0,00
4.2 Manejo de agroquímicos.	No consume, maneja o almacena				Se usan, almacenan y consumen agroquímicos (fertilizantes, herbicidas, plaguicidas, insecticidas, etc.)	0					2			0,00
4.3 Manejo de Sustancias peligrosas	No hay consumo, manejo o almacenamiento de sustancias peligrosas.				Si hay consumo, manejo o almacenamiento de sustancias peligrosas	4					2		18	16,00
4.4 Manejo de material radiactivo.	No hay consumo, manejo o almacenamiento de material radiactivo				Si hay consumo, manejo o almacenamiento de material radiactivo	0					2			0,00
4.5 Manejo de Bio Riesgos.	No hay consumo, manejo o almacenamiento de material biológico.				Si hay consumo, manejo o almacenamiento de material biológico	0					2			0,00

16,00



00004

5. CRITERIOS DE PONDERACIÓN

La nota obtenida (Valor preliminar de SIA) en el formulario adjunto debe ser ponderada con los factores siguientes para obtener la calificación final que servirá de criterio para la clasificación según la Significancia del impacto ambiental (SIA) que se indica en este documento.

1. Valor preliminar de SIA, es decir la sumatoria de todos los valores individuales (Σ)	87,00
--	-------

Según las regulaciones aplicables a la operación de la actividad, obra o proyecto

2.a Con Reglamento específico en materia ambiental que regule la actividad, obra o proyecto (p). Se multiplica la sumatoria de SIA (Σ) por un factor de 1 =	1	Decreto Ejecutivo No. _____	3. Sin Reglamento específico en materia ambiental (p) que regule la operación, se multiplica la sumatoria (Σ) de SIA por un factor de 2 =	2
2.b Con compromiso del desarrollador a adherirse voluntariamente a una norma o guía ambiental de construcción y operación, según corresponda que exista para la actividad, obra o proyecto que se plantea en el D1(p). Dicha norma o guía ambiental será de acatamiento obligatorio para el desarrollador, en lo que corresponda, desde el momento en que la SETENA le otorga la viabilidad ambiental. En este caso se multiplica la sumatoria de SIA (Σ) por un factor de 0,75 =	0,75			
		(p)		1
4. Valor de SIA ajustado por regulaciones (SIA _R) =	87			

¿igual?
F= 57
de 8538

Clasificación del área según la zona de ubicación del proyecto (β)

5. Localización autorizada por Plan Regulador u otra planificación ambiental de uso del suelo, aprobados por la SETENA, incluyendo la variable ambiental según la metodología establecida por la SETENA. Se multiplica el valor de SIA _R por un valor de 0,5 =	0,5	6. Localización autorizada por Plan Regulador NO aprobado por SETENA. Se multiplica el valor de SIA _R por un valor de 1,0 =	1
7. Localización en área sin Plan Regulador. Se multiplica el valor de SIA _R por un valor de 1,5 =	1,5	8. Localización en área ambientalmente frágil, excepto que este contemplado en el numeral 5. Se multiplica el valor de SIA _R por un valor de 2 =	2

Nota: Deberá brindarse la cita correcta del Plan Regulador o del Plan Ambiental de Uso del Suelo a que se refiere.

(β) _____

9. Calificación final de la SIA:	87
----------------------------------	----

10. Clasificación en función de la calificación final y que establece el procedimiento en SETENA, según la ruta de decisión.

Tipo	Nota	Procedimiento
A	Mayor que 1000.	Estudio de Impacto Ambiental.
B ₁	Mayor que 300 y menor o igual que 1000.	Pronóstico-Plan de Gestión Ambiental.
B ₂	Menor o igual que 300.	Declaración Jurada de Compromisos Ambientales.



000044

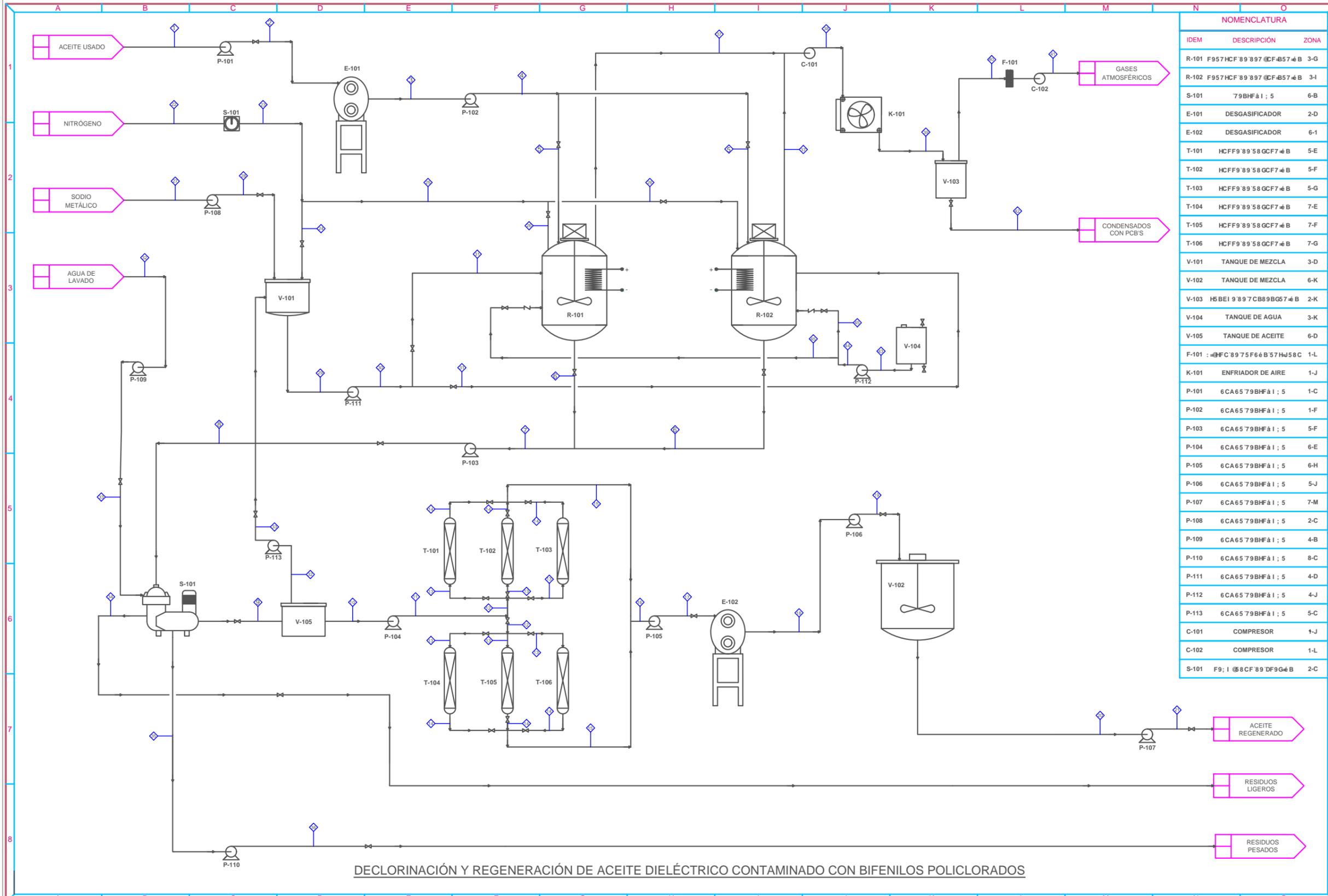
Ministerio de Ambiente y Energía
Secretaría Técnica Nacional Ambiental

ANEXO 2**Ficha de Descripción del Proyecto**

a.	Justificación técnica del Proyecto y sus opciones	El proyecto pretende brindar una alternativa sostenible, técnica e innovadora al tratamiento, regeneración y recuperación de aceite dieléctrico con Bifenilo Policlorado (PCB), por medio de un proceso de dechlorinación química, descontaminación, recategorización y recuperación de transformadores de distribución y potencia, que hasta la fecha se mantienen almacenados por los operadores eléctricos respectivos.
b.	Concordancia con el plan de uso del suelo (no es permiso de uso del suelo)	El proyecto se desarrolla en un edificio ubicado en la Zona Industrial Zeta, de Cartago, el cual es apto para la operación del proyecto en cuestión, no solo amparado por la normativa de zonificación industrial, sino también por el Plan Regulador disponible en la Municipalidad de Cartago.
c.	Resumen del proyecto a desarrollar (área del proyecto neta, metros cuadrados de construcción, componentes detalle descriptivo del diseño de sitio)	El área del proyecto consiste en 1400m ² , que implica la totalidad del área que cubre el edificio dispuesto para realizar el proceso de tratamiento, regeneración y recuperación del aceite dieléctrico contaminado con PCB (Bifenilos Policlorados). El edificio no requiere nueva construcción dado que dispone de todas las facilidades para realizar dicha operación. Hay zonas de recibo y despacho; almacenamiento inicial, temporal y final; áreas de proceso con facilidades eléctricas y mecánicas, con piso impermeabilizado por medio de una resina epóxica para evitar filtraciones, así como sistema de contención de derrames; oficinas y facilidades para el personal (sanitarios, comedor, vestidores, etc.)
d.	Actividades a realizar en cada fase del Proyecto	Durante la fase de instalación del equipo será necesario un proceso altamente controlado por especialistas y con experiencia en la materia que preparen el equipo importado de Canadá para su puesta en marcha; en tanto durante la operación, el proceso será sometido a controles específicos de eficiencia, calidad, seguridad y gestión ambiental.
e.	Tiempo de ejecución	Los trámites e instalación del equipo, así como la operación en una primera fase de trabajo (conforme contrato logrado con operador eléctrico nacional) tendrán una duración de un año. Sin embargo, el proyecto tiene una vida útil esperada de 10 años
f.	Infraestructura a desarrollar	Ninguna.
g.	Materiales a utilizar	Aceite dieléctrico contaminado con bifelinos policlorados en transformadores, aceite y transformadores descontaminados, aceite regenerado, sustancias químicas (insumos de proceso: dispersión de sodio metálico, agua, energía eléctrica).
h.	Rutas de movilización	Lo que es sujeto de movilización son los transformadores con aceite dieléctrico contaminado y descontaminado, los cuales se realizarán con camiones autorizados para tal fin y a través de las rutas de paso autorizadas por el MOPT para el transporte de materiales peligrosos según Decreto N° 24715-MOPT-MEIC-S.
i.	Frecuencia de movilización	La frecuencia de la movilización depende del programa de recibo y envío de materiales, a convenir con los clientes pero se prevee en promedio un viaje por semana.
j.	Número de empleados	Actualmente la organización dispone de personal administrativo, técnico y gerencial, que serán la base del proyecto; se pretende reforzar el equipo con al menos un profesional especialista en el área química y de seguridad industrial.
k.	Campamentos	No aplica.

ANEXO 2

**Diagrama de flujo del proceso de declorinación y regeneración del aceite
contaminado con PCB's**



NOMENCLATURA		
IDEM	DESCRIPCIÓN	ZONA
R-101	F957HCF 89 897 @CF-B57 # B	3-G
R-102	F957HCF 89 897 @CF-B57 # B	3-I
S-101	79BHF # I ; 5	6-B
E-101	DES GASIFICADOR	2-D
E-102	DES GASIFICADOR	6-1
T-101	HCFF9 89 58 GCF7 # B	5-E
T-102	HCFF9 89 58 GCF7 # B	5-F
T-103	HCFF9 89 58 GCF7 # B	5-G
T-104	HCFF9 89 58 GCF7 # B	7-E
T-105	HCFF9 89 58 GCF7 # B	7-F
T-106	HCFF9 89 58 GCF7 # B	7-G
V-101	TANQUE DE MEZCLA	3-D
V-102	TANQUE DE MEZCLA	6-K
V-103	H5BEI 9 89 7 CB89BG57 # B	2-K
V-104	TANQUE DE AGUA	3-K
V-105	TANQUE DE ACEITE	6-D
F-101	HFC 89 75 F6 # B 57HJ58 C	1-L
K-101	EN FRIADOR DE AIRE	1-J
P-101	6CA65 79BHF # I ; 5	1-C
P-102	6CA65 79BHF # I ; 5	1-F
P-103	6CA65 79BHF # I ; 5	5-F
P-104	6CA65 79BHF # I ; 5	6-E
P-105	6CA65 79BHF # I ; 5	6-H
P-106	6CA65 79BHF # I ; 5	5-J
P-107	6CA65 79BHF # I ; 5	7-M
P-108	6CA65 79BHF # I ; 5	2-C
P-109	6CA65 79BHF # I ; 5	4-B
P-110	6CA65 79BHF # I ; 5	8-C
P-111	6CA65 79BHF # I ; 5	4-D
P-112	6CA65 79BHF # I ; 5	4-J
P-113	6CA65 79BHF # I ; 5	5-C
C-101	COMPRESOR	1-J
C-102	COMPRESOR	1-L
S-101	F9; I @8CF 89 DF9G # B	2-C

5DFC657 # B7 CA # G # BF9J # GCF5 D9FA # GCG 89 7 CBGHFI 77 # B

PROYECTO:
897 @CF-B57 # B MF9; 9B9F57 # B 89 579 # B 8 # @7HF # C 7 CBH5 A-B58 C 7 CB D7 6 S

PROPIETARIO:
LUIS DIEGO WACHONG SOLANO

PROVINCIA	75 BH # B	DISTRITO	
CARTAGO	CARTAGO	SAN PEDRO	

PROFESIONAL RESPONSABLE:
NOMBRE: LUIS DIEGO WACHONG SOLANO
FIRMA: BS89 F9; . 'S' 85

DFC: 9GCB5 @F9GDCBG5 6 @ 89 8 # F977 # B H7 B # 5
NOMBRE: LUIS DIEGO WACHONG SOLANO
FIRMA: BS89 F9; . 'S' 85

#B: CFA57 # B F9; #GFC DI 6 @7C
PROPIETARIO:
SITAS:

CONTENIDO:
8 # ; F5A5 89; @ >C 89 897 @CF-B57 # B M F9; 9B9F57 # B 89 579 # B 8 # @7HF # C

ESCALA	FECHA	@ A-B5
SIN ESCALA	ABRIL 2015	1/1

DECLORINACIÓN Y REGENERACIÓN DE ACEITE DIELECTRICO CONTAMINADO CON BIFENILOS POLICLORADOS

BALANCE DE LÍNEA Y ESPECIFICACIONES

NOMBRE DE LA CORRIENTE	PUNTO DE BALANCE	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	
FLUJO MÁSIKO (kg/h)		7200	7200	7200	7200	7800	3600	7200	7200	7200	7200	7200	3600	1200	1200	1800	7200	7200	7200	7200	7200	7200	4.8	4.8	1.2	3.6	1.8	1800	1800	1800	1800	900	8220	8220	8220	522	522	1.8	3.6	3.6	3.6	3.6	522	8220	8220	4110	
TEMPERATURA (°C)		20	20	40	40	40	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20
PRESIÓN (KPa)		86	115	86	115	115	86	86	115	86	86	115	92	90	86	86	86	115	86	86	86	115	86	258	258	258	258	86	89	86	89	89	86	113	86	86	87	86	90	90	86	90	86	113	113		