

UNIVERSIDAD DE ORIENTE  
NÚCLEO DE ANZOÁTEGUI  
ESCUELA DE INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA QUÍMICA



**EVALUACIÓN DEL FUNCIONAMIENTO DE LOS SISTEMAS DE  
TRATAMIENTO DE AGUAS ACEITOSAS (API) DE UNA PLANTA  
CEMENTERA**

Realizado por:

**JUAN CARLOS POBLADOR VILLALOBOS**

Trabajo de grado presentado ante la Universidad de Oriente  
como requisito parcial para optar al título de

**INGENIERO QUÍMICO**

Puerto La Cruz, noviembre de 2010

UNIVERSIDAD DE ORIENTE  
NÚCLEO DE ANZOÁTEGUI  
ESCUELA DE INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA QUÍMICA



**EVALUACIÓN DEL FUNCIONAMIENTO DE LOS SISTEMAS DE  
TRATAMIENTO DE AGUAS ACEITOSAS (API) DE UNA PLANTA  
CEMENTERA**

Asesores:

---

**Ing. Quím. Hernán R. Raven C.**  
**Asesor Académico**

---

**Ing. Quím. Rebeca J. Meneses S.**  
**Asesor Industrial**

Puerto La Cruz, noviembre de 2010

UNIVERSIDAD DE ORIENTE  
NÚCLEO DE ANZOÁTEGUI  
ESCUELA DE INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA QUÍMICA



**EVALUACIÓN DEL FUNCIONAMIENTO DE LOS SISTEMAS DE  
TRATAMIENTO DE AGUAS ACEITOSAS (API) DE UNA PLANTA  
CEMENTERA**

Jurado:

---

**Ing. Quím. Hernán R. Raven C.**  
**Asesor Académico**

---

**Ing. Quím. Alexis J. Cova B.**  
**Jurado Principal**

---

**Ing. Quím. Ronald D. Arias C.**  
**Jurado Principal**

Puerto La Cruz, noviembre de 2010

## **RESOLUCIÓN**

De acuerdo al artículo 41 del reglamento de trabajo de grado:

“Los trabajos de grado son de exclusiva propiedad de la universidad y sólo podrán ser utilizados para otros fines con el consentimiento del Consejo de Núcleo respectivo, quien lo participará al Consejo Universitario”.

## **DEDICATORIA**

A mi madre María Adelina Villalobos Bernal, por su amor, dedicación y constancia, que me inspiran siempre a seguir adelante, sin ella no hubiera sido posible este logro, un logro de ambos.

A mis hermanos Eliannys, Sandra y Elias por su afecto y por estar conmigo en los momentos difíciles brindándome la energía necesaria.

## **AGRADECIMIENTOS**

A Dios todopoderoso, gracias por nunca abandonarme, protegerme y guiarme por el camino correcto.

A mi madre y hermanos por su apoyo incondicional en el transcurso de mi vida.

A Aniliana Sabina Sanabria Antonucci, por todo el cariño y apoyo prestado durante la elaboración de este trabajo así como también en gran parte de mi carrera.

A la Universidad de Oriente y a los profesores del departamento de Ingeniería Química, por darme la formación necesaria para poder cumplir con mi meta.

Al profesor Hernán Raven, por brindarme sus conocimientos, su ayuda y atención incondicional.

A los profesores Alexis Cova y Ronald Arias, por servir de guía en la elaboración de este trabajo.

A la Licenciada Ninoska Cilento, por el interés y apoyo prestado durante el desarrollo de la pasantía y de este trabajo.

A las Ingenieras Rebeca Meneses, Yaritza Naranjo por su tutoría durante la pasantía.

Al personal del departamento de Ambiente y Materiales de Cemex Venezuela por su amistad y apoyo durante la pasantía, en especial a las Ingenieras Amarys Guerra y María Isabel López.

A mis amigos, por estar en las buenas y en las malas.

## RESUMEN

Con el objetivo de realizar la evaluación del funcionamiento de los sistemas de tratamiento de aguas aceitosas (API) y los métodos utilizados para la disposición de sus efluentes de la planta Pertigalete, Cemex Venezuela SACA, Empresa en Transición, se recopilaron los parámetros fisicoquímicos de los efluentes (aguas clarificadas y lodos) de los sistemas; la recopilación se basó en los informes de resultado de los análisis fisicoquímicos realizados trimestralmente desde la puesta en marcha de los sistemas por un laboratorio externo, donde se verificó que todos los valores de los parámetros de las aguas clarificadas cumplen con los límites y/o rangos establecidos en la Gaceta Oficial N° 5.021, según Decreto N° 883, excepto el parámetro sulfuro que sobrepasa al límite máximo en algunos trimestres, mientras que los lodos no presentan características de peligrosidad en su contenido de metales y se consideran no tóxicos para fines de disposición. También se compararon las variables de operación con las de diseño en los equipos de los sistemas, siendo lo más resaltante que los porcentajes de remoción de aceites, grasas minerales e hidrocarburos (AGMH) y de sólidos suspendidos totales (SST) de operación actual de las unidades, desarenador Equipo Liviano (AGMH 8,00%, SST 83,35%), separador API Equipo Liviano (AGMH 81,88%, SST), desarenador Equipo Pesado (AGMH 5,31%, SST 86,98%) y separador API Equipo Pesado (AGMH 57,10%, SST 83,83%), presentan una mínima diferencia con los porcentajes de remoción de AGMH y SST de diseño; caso contrario ocurre respecto al tiempo de retención hidráulico ya que los valores de operación actuales que presentan las unidades antes mencionadas, son mayores a los valores de diseño. Además se presentó una propuesta de mejora a los métodos utilizados para la disposición de los efluentes. Para la disposición de las aguas clarificadas se

propuso la adaptación del sistema de llenado de cisternas convencionales al cisterna industrial tipo Klein 777D y en el caso de los lodos se propuso la construcción e incorporación de un lecho de secado de lodo al sistema de tratamiento de aguas aceitosas (API) de cada área, disminuyendo el impacto ambiental, los focos de contaminación y logrando el cumplimiento de la normativa ambiental vigente. Ésta propuesta fue planteada con la finalidad de darle continuidad a los métodos de disposición actual de las aguas clarificadas y lodos, debido a que se cuenta con la mayor parte de la infraestructura y con los permisos por parte del Ministerio del Poder Popular para el Ambiente para tales disposiciones. Por último se estimaron los costos de la propuesta de mejora a los métodos utilizados para la disposición de los efluentes, siendo estos de 14.208,45 Bs para la adaptación del sistema de llenado y de 12.223,85 Bs para la construcción e incorporación del lecho de secado, montos correspondientes a la inversión en un solo sistema de tratamiento y que representan un estimado de costos clase V.



## CONTENIDO

RESOLUCIÓN	iv
DEDICATORIA	v
AGRADECIMIENTOS	vi
RESUMEN	vii
CONTENIDO	ix
LISTA DE TABLAS	xv
LISTA DE FIGURAS	xviii
CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN	
1.1 DESCRIPCIÓN DE LA EMPRESA	1
1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	2
1.3 OBJETIVOS	4
1.3.1 Objetivo general	4
1.3.2 Objetivos específicos	4
CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO	
2.1 ANTECEDENTES	5
2.2 SISTEMAS DE TRATAMIENTO DE AGUAS ACEITOSAS (API)	8
2.2.1 Descripción de los sistemas	8
2.2.2 Métodos de disposición actual de los efluentes de los sistemas	10
2.3 AGUAS RESIDUALES	11
2.3.1 Tipos de aguas residuales	12
2.3.2 Constituyentes de las aguas residuales	12

2.3.2.1	Parámetros físicos	12
2.3.2.2	Parámetros químicos	13
2.3.2.3	Parámetros biológicos	15
2.3.3	Tratamiento de aguas residuales	15
2.3.3.1	Tratamiento primario	16
2.3.3.2	Tratamiento secundario	16
2.3.3.3	Tratamiento terciario	16
2.4	SEPARADOR API	17
2.4.1	Definición, características, función y descripción	17
2.4.2	Accesorios y equipos auxiliares	19
2.4.3	Diseño de separadores API	20
2.4.4	Otros modelos de separadores por gravedad	23
2.5	ANÁLISIS HIDRÁULICO	24
2.5.1	Flujo en tuberías: laminar y turbulento	24
2.5.2	Teorema de Bernoulli	25
2.5.3	Factor de fricción	26
2.5.4	Pérdidas por fricción	27
2.5.4.1	Pérdidas por longitud de tubería	27
2.5.4.2	Pérdidas por accesorios	28
2.5.5	Cabezal de la bomba	29
2.6	LODOS RESIDUALES	30
2.6.1	Lodos primarios y secundarios de aguas residuales	30
2.6.2	Primera etapa de tratamiento de lodos	31

2.6.3 Segunda etapa de tratamiento de lodos	32
2.6.4 Evacuación de lodos	32
2.6.5 Deshidratación de lodos	33
2.6.5.1 Lecho de secado (arena)	34
2.7 ECONOMÍA	36
2.7.1 Economía ambiental	36
2.7.2 Evaluación económica	37
<b>CAPÍTULO 3: DESARROLLO DEL TRABAJO</b>	
3.1 RECOPIACIÓN DE LOS PARÁMETROS FISICOQUÍMICOS DE LOS EFLUENTES DE LOS SISTEMAS	40
3.1.1 Parámetros fisicoquímicos del afluente y los efluentes de los sistemas	40
3.1.1.1 Promedio de los parámetros de afluente y efluentes de los sistemas	44
3.1.1.2 Desviación de los parámetros de afluente y efluentes de los sistemas	45
3.2 COMPARACIÓN DE LAS VARIABLES DE OPERACIÓN CON LAS DE DISEÑO EN LOS EQUIPOS DE LOS SISTEMAS	46
3.2.1 Caudales de las aguas aceitosas que ingresan a los sistemas	46
3.2.1.1 Equipos y materiales	47
3.2.1.2 Procedimiento	47
3.2.1.3 Cálculo del caudal de entrada a los sistemas	49
3.2.1.4 Promedio del caudal de entrada a los sistemas	50
3.2.2 Tiempo de retención hidráulico de las unidades de los sistemas	51

3.2.3 Eficiencia de remoción de las unidades de los sistemas	52
3.2.4 Espesor de la capa de aceite e hidrocarburo	53
3.2.4.1 Equipos y materiales	53
3.2.4.2 Sustancias	53
3.2.4.3 Procedimiento	54
3.3 PRESENTACIÓN DE PROPUESTA DE MEJORA A LOS MÉTODOS UTILIZADOS PARA LA DISPOSICIÓN DE LOS EFLUENTES	55
3.3.1 Método de disposición actual de las aguas clarificadas	55
3.3.1.1 Adaptación del sistema de llenado de cisternas convencionales al cisterna industrial tipo Klein 777D	56
3.3.2 Método de disposición actual de lodo	62
3.3.2.1 Lecho de secado	64
3.4 ESTIMACIÓN DE LOS COSTOS DE LA PROPUESTA DE MEJORA A LOS MÉTODOS UTILIZADOS PARA LA DISPOSICIÓN DE LOS EFLUENTES	65
3.4.1 Método de disposición actual de las aguas clarificadas	65
3.4.1.1 Estimado de costo de la adaptación del sistema de llenado de cisternas convencionales al cisterna industrial tipo Klein 777D	65
3.4.2 Método de disposición actual de lodo	72
3.4.2.1 Estimado de costo del lecho de secado	72
CAPÍTULO 4: DISCUSIÓN DE RESULTADOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	
4.1 RECOPIACIÓN DE LOS PARÁMETROS FISICOQUÍMICOS DE LOS EFLUENTES DE LOS SISTEMAS	80

4.1.1	Parámetros fisicoquímicos del afluente y aguas clarificadas del sistema de Equipo Liviano	82
4.1.2	Parámetros fisicoquímicos del afluente y aguas clarificadas del sistema del área de Equipo Pesado	86
4.1.3	Características de los lodos aceitosos	93
4.1.3.1	Características de los lodos aceitosos del sistema de Equipo Liviano	94
4.1.3.2	Características de los lodos aceitosos del sistema de Equipo Pesado	94
4.2	COMPARACIÓN DE LAS VARIABLES DE OPERACIÓN CON LAS DE DISEÑO EN LOS EQUIPOS DE LOS SISTEMAS	95
4.2.1	Comportamiento del caudal de entrada de los sistemas	95
4.2.2	Comportamiento de la eficiencia cronológica de remoción de AGMH de los sistemas	98
4.2.3	Comportamiento del espesor de la capa de aceite e hidrocarburo en los sistemas	100
4.2.4	Análisis comparativo de las variables de operación con las de diseño	103
4.2.4.1	Desarenador del sistema de Equipo Liviano	103
4.2.4.2	Separador API del sistema de Equipo Liviano	106
4.2.4.3	Desarenador del sistema de Equipo Pesado	108
4.2.4.4	Separador API del sistema de Equipo Pesado	110
4.3	PRESENTACIÓN DE PROPUESTA DE MEJORA A LOS MÉTODOS UTILIZADOS PARA LA DISPOSICIÓN DE LOS EFLUENTES	112
4.3.1	Método de disposición de las aguas clarificadas	112

4.3.1.1 Adaptación del sistema de llenado de cisternas convencionales al cisterna industrial tipo Klein 777D	113
4.3.2 Método de disposición de lodos	114
4.3.2.1 Mantenimiento del lecho de secado	115
4.4 ESTIMACIÓN DE LOS COSTOS DE LA PROPUESTA DE MEJORA A LOS MÉTODOS UTILIZADOS PARA LA DISPOSICIÓN DE LOS EFLUENTES	116
4.5 CONCLUSIONES	118
4.6 RECOMENDACIONES	121
BIBLIOGRAFÍA	122
ANEXO A: TABLAS DE DATOS	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
ANEXO B: TABLAS DE RESULTADOS	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
ANEXO C: FIGURAS	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>

## LISTA DE TABLAS

Tabla 2.1 Accesorios y su relación de K correspondiente	29
Tabla 2.2 Clasificación de los estimados de costos	39
Tabla 3.1 Parámetros fisicoquímicos del afluyente del sistema de Equipo Liviano	41
Tabla 3.2 Parámetros fisicoquímicos del agua clarificada de Equipo Liviano	42
Tabla 3.3 Parámetros físicos puntuales en el sistema de Equipo Liviano	43
Tabla 3.4 Características de peligrosidad de los lodos aceitosos de Equipo Liviano	43
Tabla 3.5 Características de metales presentes en los lodos de Equipo Liviano	44
Tabla 3.6 Características en lixiviado presentes en los lodos de Equipo Liviano	44
Tabla 3.7 Tiempos recopilados a un volumen fijo de 4 l, en las entradas de aguas aceitosas a los sistemas	48
Tabla 3.8 Tiempos recopilados a un volumen fijo de 2 l, en la entrada de los tanques de aguas clarificadas y fosas de hidrocarburos recuperados de los sistemas	49
Tabla 3.9 Espesor de la capa de aceite e hidrocarburo de los separadores API de los sistemas de las áreas de Equipo Liviano y Equipo Pesado	55
Tabla 3.10 Propiedades físicas del fluido	57
Tabla 3.11 Características del tramo de descarga	57
Tabla 3.12 Accesorios mecánicos presentes en la tubería de descarga	57
Tabla 3.13 Características de costo de los materiales mecánicos	67

Tabla 3.14 Características de costo de las partidas mecánicas	67
Tabla 3.15 Precio unitario de las partidas civiles y sus respectivos materiales	73
Tabla 4.1 Promedio, desviación y rango de los parámetros fisicoquímicos del afluente y aguas clarificadas de Equipo Liviano	81
Tabla 4.2 Promedio, desviación y rango de los parámetros fisicoquímicos del afluente y aguas clarificadas de Equipo Pesado	81
Tabla 4.3 Promedio, desviación y rango de los caudales a la entrada de los tanques de aguas clarificadas y las fosas de hidrocarburos de los sistemas	98
Tabla 4.4 Comparación de las variables de operación con las de diseño en el desarenador de Equipo Liviano	103
Tabla 4.5 Comparación de las variables de operación con las de diseño en el separador API de Equipo Liviano	106
Tabla 4.6 Comparación de las variables de operación con las de diseño en el desarenador de Equipo Pesado	109
Tabla 4.7 Comparación de las variables de operación con las de diseño en el separador API de Equipo Pesado	111
Tabla 4.8 Estimado de costo de la propuesta de mejora	117
Tabla A.1 Parámetros fisicoquímicos del afluente del sistema de Equipo Pesado	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
Tabla A.2 Parámetros fisicoquímicos del agua clarificada de Equipo Pesado	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
Tabla A.3 Parámetros físicos puntuales en el sistema de Equipo Pesado	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
Tabla A.4 Características de peligrosidad de los lodos aceitosos de Equipo Pesado	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
Tabla A.5 Características de metales presentes en los lodos de Equipo Pesado	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>



- Tabla A.6 Características en lixiviado presentes en los lodos de Equipo Pesado **¡Error! Marcador no definido.**
- Tabla A.7 Características del tramo de succión **¡Error! Marcador no definido.**
- Tabla A.8 Accesorios mecánicos presentes en la tubería de succión **¡Error! Marcador no definido.**
- Tabla B.1 Caudales de entrada de aguas aceitosas a los sistemas **¡Error! Marcador no definido.**
- Tabla B.2 Caudales a la entrada de los tanques de aguas clarificadas y fosas de hidrocarburos recuperados de los sistemas **¡Error! Marcador no definido.**
- Tabla B.3 Caudales promedio de entrada de aguas aceitosas a los sistemas **¡Error! Marcador no definido.**
- Tabla B.4 Eficiencia de remoción de AGMH de los sistemas de tratamiento **¡Error! Marcador no definido.**
- Tabla B.5 Variables calculadas en el tramo de descarga a diferentes caudales **¡Error! Marcador no definido.**
- Tabla B.6 Variables calculadas en el tramo de succión a diferentes caudales **¡Error! Marcador no definido.**
- Tabla B.7 Cabezal total del sistema a diferentes caudales **¡Error! Marcador no definido.**
- Tabla B.8 Área superficial y camadas del lecho de secado de lodo **¡Error! Marcador no definido.**

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 Diagrama general del proceso de los sistemas de tratamiento de aguas aceitosas (API) de la planta Pertigalete	10
Figura 2.2 Planta de un separador API	21
Figura 2.3 Secciones típicas de un separador API	22
Figura 2.4 Perspectiva de un separador API	22
Figura 2.5 Esquema de separador API	23
Figura 3.1 Diagrama del sistema de llenado, tramo de tubería existente y nuevo	56
Figura 3.2 Tanque aguas clarificadas, tramos de tuberías de succión y descarga	61
Figura 3.3 Zanja usada para el secado de lodos	63
Figura 4.1 Comportamiento de la temperatura en el afluente y efluente del sistema del área de Equipo Liviano	83
Figura 4.2 Comportamiento del pH en el afluente y efluente del sistema del área de Equipo liviano	84
Figura 4.3 Comportamiento de los AGMH en el afluente y efluente del sistema del área de Equipo Liviano	84
Figura 4.4 Comportamiento de los sulfuros en el afluente y efluente del sistema del área de Equipo Liviano	86
Figura 4.6 Comportamiento del pH en el afluente y efluente del sistema del área de Equipo Pesado	88
Figura 4.7 Comportamiento del DBO en el afluente y efluente del sistema del área de Equipo Pesado	89

Figura 4.8 Comportamiento del DQO en el afluente y efluente del sistema del área de Equipo Pesado	91
Figura 4.9 Comportamiento de AGMH en el afluente y efluente del sistema del área de Equipo Pesado	91
Figura 4.10 Comportamiento de los sulfuros en el afluente y efluente del sistema del área de Equipo Pesado	93
Figura 4.11 Comportamiento del caudal promedio al día de la entrada al sistema de Equipo Liviano	97
Figura 4.12 Comportamiento del caudal promedio al día de la entrada al sistema de Equipo Pesado	97
Figura 4.13 Comportamiento de la eficiencia cronológica de remoción de AGMH del sistema de Equipo Liviano	99
Figura 4.14 Comportamiento de la eficiencia cronológica de remoción de AGMH del sistema de Equipo Pesado	100
Figura 4.15 Comportamiento del espesor de la capa de aceite e hidrocarburo a lo largo del separador API de Equipo Liviano	101
Figura 4.16 Comportamiento del espesor de la capa de aceite e hidrocarburo a lo largo del separador API de Equipo Pesado	102
Figura 4.17 Desarenador de Equipo Liviano	104
Figura 4.18 Entrada al desarenador de Equipo Liviano	105
Figura 4.19 Fosa de la tubería de admisión al desarenador de Equipo Liviano	105
Figura 4.20 Tubería de entrada a la fosa de hidrocarburos de Equipo Liviano	107
Figura 4.21 Sistema de tratamiento de Equipo Liviano	108
Figura 4.22 Entrada al desarenador de Equipo Pesado	110
Figura 4.23 Sistema de tratamiento de Equipo Pesado	112

Figura 4.24 Curva característica de diseño vs curva característica de operación de la bomba del sistema de llenado

113

Figura C.1 Comportamiento del color en el afluente y efluente del sistema del área de Equipo Liviano **¡Error! Marcador no definido.**

Figura C.2 Comportamiento del DBO en el afluente y efluente del sistema del área de Equipo Liviano **¡Error! Marcador no definido.**

Figura C.3 Comportamiento del DQO en el afluente y efluente del sistema del área de Equipo Liviano **¡Error! Marcador no definido.**

Figura C.4 Comportamiento del nitrógeno total en el afluente y efluente del sistema del área de Equipo Liviano **¡Error! Marcador no definido.**

Figura C.5 Comportamiento del fósforo total en el afluente y efluente del sistema del área de Equipo Liviano **¡Error! Marcador no definido.**

Figura C.6 Comportamiento de los fluoruros en el afluente y efluente del sistema del área de Equipo Liviano **¡Error! Marcador no definido.**

Figura C.7 Comportamiento de los fenoles en el afluente y efluente del sistema del área de Equipo Liviano **¡Error! Marcador no definido.**

Figura C.8 Comportamiento de los coliformes totales en el afluente y efluente del sistema del área de Equipo Liviano **¡Error! Marcador no definido.**

Figura C.9 Comportamiento del color en el afluente y efluente del sistema del área de Equipo Pesado **¡Error! Marcador no definido.**

Figura C.10 Comportamiento del nitrógeno total en el afluente y efluente del sistema del área de Equipo Pesado **¡Error! Marcador no definido.**

Figura C.11 Comportamiento del fósforo total en el afluente y efluente del sistema del área de Equipo Pesado **¡Error! Marcador no definido.**

Figura C.12 Comportamiento de los fluoruros en el afluente y efluente del sistema del área de Equipo Pesado **¡Error! Marcador no definido.**

Figura C.13 Comportamiento de los fenoles en el afluente y efluente del sistema del área de Equipo Pesado **¡Error! Marcador no definido.**

Figura C.14 Comportamiento de los coliformes totales en el afluente y efluente del sistema del área de Equipo Pesado **¡Error! Marcador no definido.**

# **CAPÍTULO 1**

## **INTRODUCCIÓN**

### **1.1 DESCRIPCIÓN DE LA EMPRESA**

Cemex Venezuela SACA, es una organización industrial dedicada a la fabricación, comercialización y transporte de cemento, yeso, concreto y sus agregados. Con el nombre de Venezolana de Cementos, CA, fue fundada en la ciudad de Caracas en el año 1943 por iniciativa del señor Eugenio Mendoza y un grupo de personas con visión futurista.

La empresa cuenta con cuatro plantas cementeras: planta Lara ubicada en Barquisimeto estado Lara, instalada en 1945, planta Mara ubicada en Maracaibo estado Zulia, instalada en 1947, planta Pertigalete ubicada en el estado Anzoátegui, instalada en 1949 y planta Guayana ubicada en Puerto Ordaz estado Bolívar, adquirida en 1993. Además cuenta con oficinas principales ubicadas en la capital del país, un terminal marítimo de recepción y despacho en Catia la Mar y un centro de distribución en Porlamar, estado Nueva Esparta. Con esta distribución estratégica se atienden los mercados de consumo del centro, oriente y occidente de Venezuela.

La planta Pertigalete está ubicada específicamente en las costas del municipio Guanta, en la zona de Pertigalete; limita al norte con el mar Caribe, al sur con la carretera nacional Guanta-Cumaná, al este con el tramo Arapo y al oeste con Pamatacualito en el estado Anzoátegui, está compuesta de dos plantas Pertigalete I y Pertigalete II, las cuales poseen una capacidad anual de producción en el orden de los 3 millones de toneladas métricas de clinker. Pertigalete I comenzó operaciones en 1949, cuenta con cinco hornos y el proceso de producción se realiza por vía húmeda, Pertigalete II fue

inaugurada en 1973, es la mayor de todas las plantas de la organización y el proceso se realiza por vía seca (Cemex Venezuela SACA, 1990).

Además la planta Pertigalete cuenta con una planta de yeso, donde se fabrica actualmente yeso tipo I y se encarga del abastecimiento nacional y en ocasiones se exporta este yeso hacia las islas del Caribe.

En 1994 la Corporación Venezolana de Cementos SACA se integra a la empresa internacional Cemex de México, cuarto productor mundial de cemento, que finaliza en julio de 2008 con la nacionalización por parte del estado venezolano, por lo que la empresa se encuentra en un estado de transición.

## **1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

El proceso de producción de cemento no genera efluentes industriales; toda el agua requerida en el proceso de fabricación se consume dentro de los hornos a temperaturas que superan los 1.450 °C, pero poseen áreas como la Estación de Servicio de Equipo Liviano, Movilización y Estación de Servicio de Equipo Pesado que generan aguas contaminadas con aceites, grasas y combustibles por efecto de las operaciones propias de suministro de combustibles y lubricantes, lavado y reparación de vehículos. Estos efluentes se conducen a sistemas de tratamiento para garantizar los parámetros físicos y químicos conforme a las exigencias de la normativa ambiental vigente.

Las áreas de Estación de Servicio de Equipo Liviano y de Estación de Servicio de Equipo Pesado están dotadas de un desarenador, un separador API, una fosa de hidrocarburos recuperados y un tanque de almacenamiento de agua clarificada con estación de bombeo para el llenado de camiones cisternas convencionales. Este conjunto de equipos se denomina sistema de tratamiento de aguas aceitosas (API). En el caso del área de Movilización no se cuenta con este sistema pero las aguas contaminadas son captadas y

transportadas al sistema de tratamiento del área estación de Servicio de Equipo Liviano.

Los efluentes que se obtienen del sistema de tratamiento de aguas aceitosas (API) son hidrocarburos recuperados, aguas clarificadas y lodos aceitosos. El método de tratamiento y/o disposición final que se le aplica a cada uno de ellos es: tratamiento térmico a los hidrocarburos recuperados por co-procesamiento en los hornos de Pertigalete I y disposición de las aguas clarificadas con aprovechamiento en el riego de vías no pavimentadas. Ésta actividad en la actualidad no se efectúa debido a que en la planta Pertigalete no se cuenta con cisternas convencionales, mientras que los lodos no cuentan con un método de disposición adecuado, siendo succionados y depositados en zanjas hechas por palas mecánicas en el patio de esquisto San José, produciendo contaminación por lixiviación; al transcurrir cierto tiempo son mezclados con el esquisto para luego ser introducidos como parte de la materia prima al proceso de producción de cemento; razón por la cual el Ministerio del Poder Popular para la Salud exigió a la empresa Cemex Venezuela SACA, mejorar el método de disposición de lodos aceitosos.

En atención a lo anteriormente descrito, la gerencia de Calidad y Ambiente propone la evaluación del funcionamiento de los sistemas de tratamiento de aguas aceitosas (API) y los métodos utilizados para la disposición de sus efluentes. Para ello será necesario la recopilación de los parámetros fisicoquímicos de los efluentes, comparación de las variables de operación con las de diseño en los equipos de los sistemas, la presentación de propuesta de mejora a los métodos utilizados para la disposición de los efluentes y la estimación de los costos de la propuesta de mejora a los métodos utilizados para la disposición de los efluentes.

Los resultados obtenidos en esta evaluación permitirán determinar las fallas que puedan presentar los sistemas de tratamiento de aguas aceitosas



(API) y servir como base para presentar ante la empresa Cemex Venezuela SACA, las recomendaciones necesarias y más viables de mejora de los sistemas y de los métodos utilizados para la disposición de sus efluentes, en función del ahorro en la utilización e inversión de recursos, energía y costos de operación para garantizar la confiabilidad del sistema de operación y además contribuir con la conservación ambiental y el cumplimiento de la normativa ambiental vigente.

### **1.3 OBJETIVOS**

#### **1.3.1 Objetivo general**

Evaluar el funcionamiento de los sistemas de tratamiento de aguas aceitosas (API) y los métodos utilizados para la disposición de sus efluentes de la planta Pertigalete, Cemex Venezuela SACA, Empresa en Transición.

#### **1.3.2 Objetivos específicos**

1. Recopilar los parámetros fisicoquímicos de los efluentes de los sistemas.
2. Comparar las variables de operación con las de diseño en los equipos de los sistemas.
3. Presentar propuesta de mejora a los métodos utilizados para la disposición de los efluentes.
4. Estimar los costos de la propuesta de mejora a los métodos utilizados para la disposición de los efluentes.

## **CAPÍTULO 2**

### **MARCO TEÓRICO**

#### **2.1 ANTECEDENTES**

Reyes (2008) evaluó diferentes sistemas de tratamiento para el acondicionamiento y reuso de los efluentes industriales generados en la refinería de Puerto La Cruz (PLC), Petróleos de Venezuela Sociedad Anónima (PDVSA), para ésto cuantificó y caracterizó las aguas industriales generadas en cada una de las unidades de proceso y en los tanques de almacenamiento de crudos y productos, identificó que las aguas enviadas al sistema de tratamiento de efluentes de proceso (STEP) tienen calidades de aguas condensadas, despojadas, desmineralizada y aceitosas, donde las tres primeras se pueden reutilizar sin tratamiento previo en las torres de enfriamiento, desaladores y lavado de plantas o equipos respectivamente. Luego analizó y seleccionó la tecnología de acuerdo a las factibilidades operacionales, económicas y ambientales, además presentó el diagrama de flujo del sistema de tratamiento, resultando de todo esto la ozonólisis-ultrafiltración, ozonólisis-filtro de arena y el separador API respectivamente.

Ochoa (2006) determinó la factibilidad técnico-económica del tratamiento y reutilización de los efluentes de las unidades de proceso del STEP de la refinería de PLC. Inicialmente identificó los puntos de salida de aguas industriales de las unidades de la refinería hacia el sistema de tratamiento, detallando aquellos procesos que requieran agua fresca para su funcionamiento, luego caracterizó fisicoquímicamente el agua requerida a la entrada de dichas unidades, además estudió las tecnologías necesarias. A fin de solventar los problemas de exceso de carga al STEP y minimizar el uso de agua fresca, propuso la aplicación técnica de tres casos, primer caso,

descarga de aguas mineralizadas al medio marino, de fácil aplicación, menor efectividad ambiental y costo, segundo caso, reuso de las aguas mineralizadas, siendo rentable económicamente y beneficioso al ambiente, tercer caso, reuso del efluente proveniente del STEP, de mayor complejidad técnica y eficiencia ambiental pero no rentable económicamente.

Correa (2005) determinó las causas del alto contenido de aceites y grasas a la salida del tratamiento primario de una planta de efluentes industriales en un complejo mejorador de crudo extra pesado (Petrozuata), el tratamiento está integrado por un clarificador primario, un tanque de igualación, cuatro filtros, dos separadores API y una unidad de flotación inducida por aire (IGF). Para ello identificó los factores que limitan la separación de aceites y grasas, realizó un inventario de la procedencia de los aditivos y dosificaciones usadas en el proceso, cuantificó los caudales de las aguas residuales, caracterizó fisicoquímicamente los efluentes del sistema de tratamiento y propuso soluciones para obtenerlos dentro de la normativa ambiental. Se obtuvo como resultado la atribución de la formación de microemulsiones estables que impiden la separación de la fases a los productos Embreak 2W158L y Philmplus 5K7 usados en el proceso y se recomendó usar los separadores API e IGF a valores de pH próximos a 6,46.

Marín (2004) estudió el aprovechamiento de los lodos residuales provenientes de la planta de tratamiento de aguas industriales de una ensambladora de vehículos automotores (MMC Automotriz SA), con la finalidad de encontrar una alternativa rentable para la disposición final de dicho lodo, cumpliendo con la normativa ambiental vigente, en búsqueda de una reutilización, regeneración o reciclaje según sea el caso, al fin de evitar el almacenamiento de grandes cantidades que se producen a diario en la planta de tratamiento. Para ello se caracterizó las corrientes involucradas en el proceso de donde proviene dicho lodo y se estudió los factores que afectan su producción. De acuerdo a los resultados y a lo establecido por la

normativa ambiental, el lodo no es contaminante, pudiéndose reutilizar como materia prima en procesos de aplicación industrial como aditivos para baldosas, fertilizantes en relleno sanitario y en la elaboración de impermeabilizantes, siendo la última opción la más conveniente económicamente.

Dibella (2002) evaluó el comportamiento operacional del sistema de tratamiento de efluentes industriales del mejorador Operadora Cerro Negro bajo condiciones de arranque, el sistema posee dos procesos de tratamiento, uno fisicoquímico conformado por dos separadores API y dos unidades de flotación por aire disuelto (DAF) y otro biológico. La evaluación consistió en determinar si los contaminantes que posee el afluente se encuentran dentro de los valores de diseño, comparar la eficiencia de los equipos del sistema con el diseño y analizar si los efluentes cumplen con la normativa legal. Entre los resultados obtenidos se tiene que el efluente de los equipos de desalación y tanquillas de aguas aceitosas presentan diferencias con los valores de diseño en varios parámetros, la eficiencia de remoción de hidrocarburos y sólidos suspendidos de los separadores API y DAF presentan desviación con respecto a los de diseño y el efluente del sistema incumple con dos parámetros según la normativa legal.

Nitsche (1994) evaluó el separador API de la refinería de PLC, Corpoven, debido que presentaba sucesivas fallas en sus equipos principales (bombas, puentes, entre otros), así como el continuo paso de materia aceitosa al tanque pulmón, situación que afectaba directamente al STEP. La evaluación consistió en la caracterización fisicoquímica de sus afluentes y efluentes, inspección y evaluación general de la operación realizada en el separador para entender las condiciones de su funcionamiento, además la identificación y desempeño de los equipos pertenecientes. El resultado de su investigación fue una mayor comprensión del sistema y recomendaciones de mejoras al sistema de distribución de

cargas y tracción de guayas de los puentes de barrido de lodo y nafta, además la sustitución de las bombas reciprocantes.

En el presente trabajo se evaluará el funcionamiento de los sistemas de tratamiento de aguas aceitosas (API) y los métodos utilizados para la disposición de sus efluentes, este trabajo posee una relación evidente con todos los trabajos presentados como antecedentes, no solo porque estudien los procesos que generan aguas industriales, los sistemas de tratamiento y el manejo de los efluentes de estos tratamientos, sino también por la afinidad de los objetivos específicos que se desean lograr, como lo son caracterizar fisicoquímicamente los afluentes y efluentes, comparar las variables de operación con las de diseño y presentar propuestas de mejoras con su respectivo análisis económico que beneficie a la empresa y a la conservación del ambiente.

Aunque los objetivos de estos trabajos sean afines, su desarrollo no necesariamente es igual, debido a que se deben adecuar a las condiciones del área o campo de trabajo donde se realiza, resaltando la principal diferencia de estos trabajos de investigación con el actual, ya que la mayoría de los antecedentes son estudios realizados en plantas que manejan procesos con petróleo y/o sus derivados, donde las cantidades generadas de aguas industriales y las necesidades de tratamiento de ellas no se comparan a las generadas en una planta cementera que es el área de estudio del presente trabajo.

## **2.2 SISTEMAS DE TRATAMIENTO DE AGUAS ACEITOSAS (API)**

### **2.2.1 Descripción de los sistemas**

Los sistemas de tratamiento de aguas aceitosas (API) de la planta Pertigalete se basan en un tratamiento primario de separación agua/aceite, sus equipos principales son un desarenador, un separador tipo API, una fosa

de hidrocarburos recuperados con bombas para la succión y recirculación y un tanque de aguas clarificadas con estación de bombeo, estos sistemas se encuentran ubicados en las áreas de Estación de Servicio de Equipo liviano y Estación de Servicio de Equipo Pesado, con un caudal de diseño de 36 l/s y 9,50 l/s respectivamente (Varsinca Ingenieros Consultores, 2004).

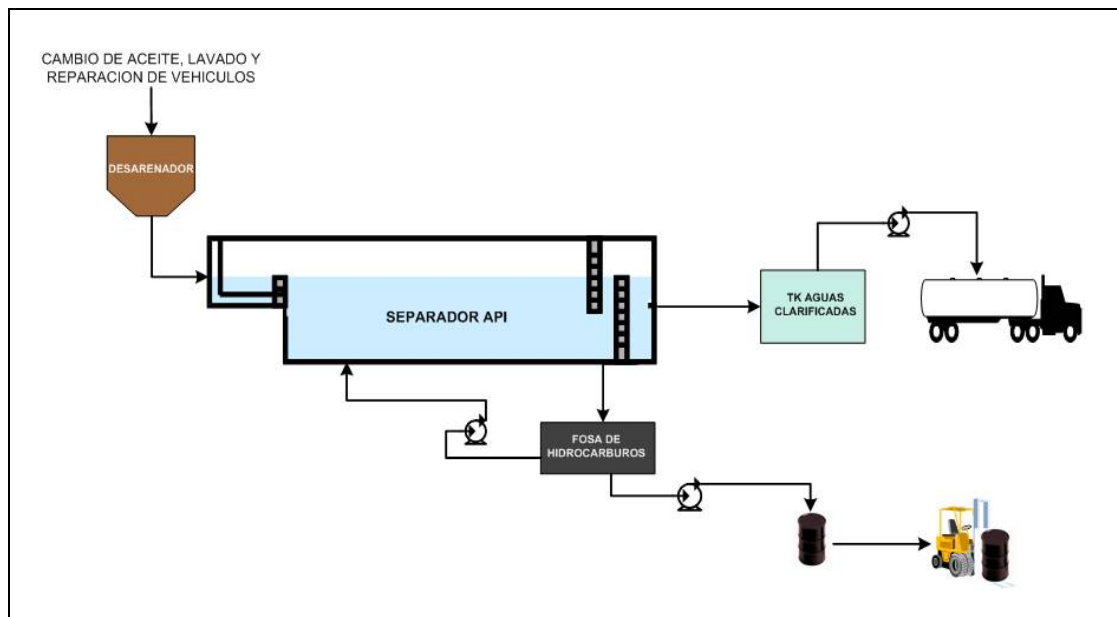
El proceso general de los sistemas de ambas áreas se puede describir de igual forma y observarse en la figura 2.1.

Las aguas aceitosas producidas por las operaciones de suministro de combustibles y lubricantes, lavado y reparación de vehículos, fluyen por gravedad desde la fosa de servicio hasta un desarenador, dotado de una válvula mariposa automática a la entrada para cortar el flujo de agua en caso de ser requerido, desde el desarenador las aguas pasan a un separador del tipo API, el cual está basado en el principio de la segregación de componentes no miscibles (agua, aceite y sólidos) por efecto de la diferencia de densidades, se le denomina separador API porque su diseño está patentado por el American Petroleum Institute (API). En el separador el agua fluye horizontalmente mientras que los glóbulos de hidrocarburos ascienden debido a las fuerzas de empuje o de flotación, el separador está dotado de una cámara para sedimentos, un desnatador (recolector de hidrocarburos) con pantalla separadora sumergida y una rejilla metálica con barras verticales para disminuir la turbulencia del flujo.

Los efluentes que se obtienen del separador API son aguas clarificadas, hidrocarburos recuperados y lodos aceitosos. Las aguas clarificadas fluyen por gravedad hacia el tanque de aguas clarificadas, dotado de un sistema de bombeo para el llenado de camiones cisternas convencionales, los hidrocarburos recolectados por el desnatador pasan a la fosa de hidrocarburos recuperados, la cual posee un equipo de bombeo para el llenado de tambores que son transportados hacia el área de almacenamiento central de aceites usados y un equipo de bombeo para la recirculación de la

fosa al separador API el agua que pueda penetrar por la operación del desnatador en la recolección de los hidrocarburos. En el caso de los lodos aceitosos, éstos son extraídos en el mantenimiento mensual del separador API por un camión de vacío.

Cabe destacar que el área de Movilización no cuenta con un sistema de tratamiento de aguas aceitosas (API), pero sus aguas contaminadas con hidrocarburos son captadas y transportadas al separador API del sistema de tratamiento del área de Estación de Servicio de Equipo Liviano.



**Figura 2.1 Diagrama general del proceso de los sistemas de tratamiento de aguas aceitosas (API) de la planta Pertigalete.**

### 2.2.2 Métodos de disposición actual de los efluentes de los sistemas

El método de tratamiento y/o disposición final que se le aplica a los efluentes de los sistemas de tratamiento de aguas aceitosas (API) son:

- Hidrocarburos recuperados: tratamiento térmico por co-procesamiento en los hornos de Pertigalete I, actualmente se realiza un estudio paralelo

al presente trabajo para mejorar las instalaciones de este método de tratamiento.

- Aguas clarificadas: aprovechamiento en el riego de vías no pavimentadas, actividad que no se efectúa actualmente debido a que en la planta Pertigalete no se cuenta con camiones cisternas convencionales sino con un camión cisterna industrial tipo Klein 777D que por sus dimensiones no se acopla a las instalaciones del sistema de bombeo.
- Lodos aceitosos: depositados en zanjas de aproximadamente 3 m<sup>3</sup> de capacidad hechas por palas mecánicas en el patio de esquisto San José y al transcurrir un tiempo cercano a un mes (o dependiendo de las necesidades de esquisto) son mezclados con el esquisto para luego ser introducidos como parte de la materia prima al proceso de producción de cemento.

### **2.3 AGUAS RESIDUALES**

En la mayoría de las actividades que el hombre realiza, se generan aguas residuales. En general las aguas residuales están compuestas por un 99% de agua y 1% de materiales en suspensión y solución que le imparten características indeseables. Las sustancias que se le han agregado al agua durante su uso comprenden (Orue, 1984):

- Materiales orgánicos, que demandan oxígeno por su oxidación.
- Sólidos en suspensión, que sedimentan al fondo de los cuerpos de aguas.
- Metales pesados y compuestos tóxicos.
- Nitrógeno y fósforo, que favorecen el crecimiento másico de los organismos que trastornan el equilibrio ecológico de los ríos y lagos.
- Color y turbiedad, que reducen la penetración de la luz.



- Grasas, aceites y materiales flotantes, que interfieren en la transferencia de oxígeno a la atmosfera.
- Compuestos refractarios en ocasiones tóxicos que no se descomponen y permanecen en el agua.

### **2.3.1 Tipos de aguas residuales**

Las aguas residuales se pueden clasificar según su origen en (Orue, 1984):

- Aguas domesticas: son el resultado de las actividades cotidianas de las personas, por ejemplo, lavado de ropa, aseo de viviendas e higiene personal.
- Aguas de uso agrícola: son producidas como resultado del riego de sembradíos y toda actividad relacionada con la labor agrícola.
- Aguas pluviales: son producto de la esorrentía superficial.
- Aguas industriales: se generan de las diversas operaciones que se desarrollan en un proceso determinado, por ejemplo, operación de desorción, procesos químicos, lavado de materiales, fugas, derrames y cualquier actividad de limpieza.

### **2.3.2 Constituyentes de las aguas residuales**

Los constituyentes encontrados en las aguas residuales pueden ser clasificados como físicos, químicos y biológicos (Crites, Tchobanoglous, 2000).

#### **2.3.2.1 Parámetros físicos**

Las propiedades físicas son, en muchos casos, relativamente fáciles de medir. Algunos de estos parámetros son:

- Temperatura (T): la medición de la temperatura del agua residual es importante, ya que muchos sistemas de tratamiento de aguas incluyen procesos biológicos que dependen de la temperatura.
- Color: el color en las aguas residuales es causado por sólidos suspendidos, material coloidal y sustancias en solución. Las aguas contaminadas pueden tener muy diversos colores pero, en general, no se pueden establecer relaciones claras entre el color y el tipo de contaminación.
- Olor y sabor: los compuestos químicos presentes en el agua como los fenoles, diversos hidrocarburos, cloro, materia orgánica en descomposición o esencias liberadas por diferentes algas u hongos pueden dar olores y sabores muy fuertes al agua, aunque estén en pequeñas concentraciones.
- Materiales en suspensión: partículas como arcilla, limo y otras, aunque no lleguen a estar disueltas, son arrastradas por el agua de dos maneras, en suspensión estable (disoluciones coloidales); o en suspensión que sólo dura mientras el movimiento del agua las arrastra. Las suspendidas coloidalmente sólo precipitan después de haber sufrido coagulación o floculación.

### **2.3.2.2 Parámetros químicos**

Las características químicas tienden a ser más específicas en su naturaleza que algunos parámetros físicos y por eso son más útiles para evaluar las propiedades de una muestra de inmediato, éstas se presentan a continuación (Tebbut, 1998):

- pH: la concentración del ion hidrógeno es un importante parámetro de calidad tanto de las aguas naturales como de las residuales. El intervalo de concentración idóneo para la existencia de la mayoría de la vida

biológica es muy estrecho y crítico. El agua residual con una concentración adversa de ion hidrógeno es difícil de tratar por medios biológicos y si la concentración no se altera antes de la evacuación, el efluente puede alterar la concentración de las aguas naturales (Metcalf, Eddy, 1996).

- Oxígeno disuelto (OD): las aguas superficiales limpias suelen estar saturadas de oxígeno, lo que es fundamental para la vida. Si el nivel de oxígeno disuelto es bajo indica contaminación con materia orgánica, septicización, mala calidad del agua e incapacidad para mantener determinadas formas de vida.
- Demanda bioquímica de oxígeno (DBO): es la cantidad de oxígeno disuelto requerido por los microorganismos para la oxidación aerobia de la materia orgánica presente en el agua. Se mide a los cinco días. Su valor da idea del agua desde el punto de vista de la materia orgánica presente y permite prever cuanto oxígeno será necesario para la depuración de esas aguas e ir comprobando cual está siendo la eficiencia del tratamiento depurador en una planta.
- Demanda química de oxígeno (DQO): es la cantidad de oxígeno que se necesita para oxidar los materiales contenidos en el agua con un oxidante químico. Se determina en tres horas y en la mayoría de los casos, guarda una buena relación con la DBO por lo que es de gran utilidad al no necesitar los cinco días de la DBO. Sin embargo la DQO no diferencia entre materia biodegradable y el resto, además no suministra información sobre la velocidad de degradación en condiciones naturales.
- Nitrógeno total: varios compuestos de nitrógeno son nutrientes esenciales. Su presencia en exceso en las aguas es causa de eutrofización. El nitrógeno se presenta en diferentes formas químicas en las aguas naturales y contaminadas. En los análisis habituales se suele

determinar el nitrógeno total Kjeldahl (NTK) que incluye el nitrógeno orgánico y el amoniacal.

- Fósforo total: el fósforo es también esencial para el crecimiento de las algas y otros organismos biológicos. Debido a los crecimientos explosivos nocivos que tienen lugar en las aguas superficiales, existe mucho interés en la actualidad en controlar la cantidad de los compuestos de fósforo que entran en las aguas superficiales.
- Compuestos orgánicos: los aceites y grasa procedentes de restos de alimentos o de procesos industriales (automóviles, lubricantes, etc.) son difíciles de metabolizar por las bacterias y flotan formando películas en el agua que dañan a los seres vivos.

### **2.3.2.3 Parámetros biológicos**

La presencia de organismos coliformes se interpreta como un indicador de que los organismos patógenos también pueden estar presentes en las aguas debido a que estos se encuentran en mayor número y son fáciles de detectar, su ausencia indica que el agua se halla exenta de organismos productores de enfermedades. Las bacterias coliformes incluyen los géneros *Escherichia* y *Aerobacter* siendo éstos los organismos que más se utilizan como indicador de la contaminación fecal (Metcalf, Eddy, 1996).

### **2.3.3 Tratamiento de aguas residuales**

El tratamiento de aguas residuales consiste en una serie de procesos físicos y químicos, con el objetivo de eliminar las impurezas presentes en el agua, a fin de hacerla apta para cumplir con los requerimientos sanitarios. Los diferentes procesos de tratamiento a los que se pueden someter varían según el grado de purificación que se desea lograr. Los tratamientos se pueden clasificar en primarios, secundarios y terciarios (Orue, 1984).

### **2.3.3.1 Tratamiento primario**

La función del tratamiento primario es eliminar desperdicios como sólidos flotantes y suspendidos, mediante la utilización de técnicas fisicoquímicas y mecánicas. Las etapas de este tratamiento se componen de (Petrozuata, 1999):

- Sedimentación.
- Inyección química.
- Filtración.
- Igualación.

### **2.3.3.2 Tratamiento secundario**

El objetivo del tratamiento secundario es remover la carga de contaminante DBO soluble, además de remover cantidades adicionales de sólidos suspendidos. Estas remociones se efectúan por medio de procesos biológicos. En el tratamiento secundario de tipo biológico, la materia orgánica es utilizada como alimento de los microorganismos, tales como, hongos, bacterias, protozoos, rotíferos, etc., de tal manera que aquellas sean transformadas en  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$  y en un nuevo material celular. Los mecanismos usados en el tratamiento secundario son (Petrozuata, 1999):

- Lagunas aireadas.
- Filtros de goteo.
- Lodos activados.
- Lechos biológicos.

### **2.3.3.3 Tratamiento terciario**

Este tipo de tratamiento se utiliza cuando, después de un tratamiento primario y secundario, la calidad del agua obtenida no cumple con los requerimientos establecidos.

Los equipos usados para el tratamiento terciario son especializados y de alta tecnología ya que su objetivo es remover la mayor cantidad posible de contaminantes específicos de un efluente. Entre tales tratamientos se mencionan (Petrozuata, 1999):

- Ósmosis inversa.
- Desalación.
- Extracción por solventes.
- Intercambio iónico.
- Electrodialisis.

## **2.4 SEPARADOR API**

### **2.4.1 Definición, características, función y descripción**

El separador API es la unidad básica para la recuperación de crudos o aceites del sistema de aguas de una industria (petrolera y petroquímica generalmente) a través del efecto de gravedad. Su función es separar crudos o aceites a través de la diferencia de densidades entre el agua y el aceite por el fenómeno de flotación, por sedimentación de los sólidos contenidos en el agua. Es una cámara rectangular de concreto a nivel del suelo, debe tener dos o más canales para proveer continuidad a la operación.

El afluente agua-aceite se introduce al separador, que por diferencia de densidades, comienza a separarse el crudo y el agua, el crudo se suspende y es arrastrado tanto por el puente como por un pequeño declive que facilita su desplazamiento, luego es introducido al tubo recolector que a su vez succiona y lo envía para un tanque de recolección. Además, en el fondo se depositan los sedimentos que son arrastrados por un puente hacia unas tolvas, son succionadas por otras bombas, para luego ubicarlas en un tanque de lodos, estos lodos son tratados posteriormente. El afluente entra por un

extremo de la cámara y el efluente sale por el otro extremo. Los tiempos de residencia son relativamente altas para asegurar la separación, aproximadamente 4-20 horas en condiciones normales (American Petroleum Institute, 1969).

La aplicación, ventajas y desventajas del separador API como equipo separador por gravedad serán presentadas a continuación (PDVSA, 1999):

Aplicación:

- Remueve crudo hasta un contenido entre 50 y 100 mg/l.
- Remoción de crudo libre para tamaños de partículas de crudo iguales o mayores a 150 micras.
- Remueve sólidos en suspensión.

Ventajas:

- Operación sencilla y ampliamente conocida.
- Mantenimiento fácil, no se obstruye al no contar con internos.
- El contenido de sólidos no afecta la eficiencia de remoción del crudo.
- Pueden ser utilizados con o sin el uso de aditivos químicos.

Desventajas:

- Ocupan grandes espacios.
- Necesitan sistemas para el control de los vapores y olores generados.
- Se requieren al menos dos canales para facilitar el proceso de limpieza.
- Trabaja mejor bajo condiciones de flujo uniforme.

La eficiencia de este equipo viene dada por las características del crudo asociado y del agua, por el tamaño de las partículas de crudo y por el tamaño de la unidad. Pueden alcanzar eficiencias elevadas de 75 % y más (PDVSA, 1999).

### **2.4.2 Accesorios y equipos auxiliares**

Debe constar con una unidad desarenadora previa, que es una estructura diseñada para retener arena y partículas en suspensión gruesa que traen las aguas servidas o las aguas superficiales a fin de evitar que ingresen, al canal de adecuación, a la central hidroeléctrica o al proceso de tratamiento y lo obstaculicen creando serios problemas o aumentando la necesidad de mantenimiento al sistema de tratamiento. El desarenado se refiere normalmente a la remoción de las partículas superiores a 0,2 mm. Existen varios tipos de desarenadores, los fundamentales son: desarenador de flujo horizontal, de flujo vertical y de flujo inducido, siendo el de flujo horizontal el más utilizado en instalaciones de pequeñas poblaciones o sistemas de tratamientos sencillos.

El separador API además de requerir una unidad desarenadora previa, puede tener varios accesorios internos (American Petroleum Institute, 1969):

- Pre-separador: pared o cámara menor de recepción del afluente para disminuir el flujo.
- Tolva de recolección: fosa interna para la recolección de lodos, ubicados generalmente al extremo por donde está la entrada del fluido.
- Tubo recolector de nata superficial: cilindro que recolecta el crudo o aceite, ubicado en el extremo de la salida del efluente, porque se considera que hay más separación por tener mayor tiempo de retención.
- Puente de barrido: trenes de pantalla que empujan el lodo y la nata, el primero a las tolvas y el segundo a los tubos recolectores de nata, facilitando mecánicamente la recolección.
- Barra final: pared a lo largo, pero no completa hasta el fondo del separador, que deja libre el paso del agua y detiene el aceite por la parte superior.



- Sección o cámara final: cámara ubicada al extremo de la salida del separador que retiene el agua antes de su paso a la otra unidad.

También tiene equipos auxiliares como: bombas de succión de lodos y crudos, usadas generalmente para su traslado; las paredes de los canales, que dividen al separador API en tramos diferentes para el momento de limpieza o mantenimiento; válvulas, para el control de las líneas de transporte y manejo del flujo en los canales; motores de movilización del puente, para el desplazamiento de los trenes de barrido a una velocidad definida (generalmente baja para no generar agitación que evitaría la separación); líneas de vapor, para facilitar la remoción de lodos o en caso de zonas frías para facilitar el fenómeno de flotación y sedimentación.

#### **2.4.3 Diseño de separadores API**

A través de muchos años de estudio y trabajo experimental se ha logrado adoptar principios fundamentales para el desarrollo de bases matemáticas para la determinación de formas y dimensiones del separador API, siendo la tasa de flujo, la gravedad del aceite y la temperatura del agua, los factores que más afectan el diseño (American Petroleum Institute, 1990).

El principio básico a asumir es que la gota de aceite a flotar tiene un diámetro de 0,015 cm, a partir de la Ley de Stokes, se determina la velocidad de flotación de la partícula, la cual por consideración al diseño equivale quince veces la velocidad horizontal del flujo pero no debe exceder los 3 pie/s. El área transversal está relacionada con el caudal del separador y la velocidad horizontal. Se considera la profundidad entre 3 y 8 pies o se adopta un ancho de cada canal entre 6 y 20 pies y también existe una relación de la profundidad con el ancho entre 0,3 y 0,5. El número de canales se determina entre el área transversal calculada y el área del canal prefijado, el número de canales debe ser mayor o igual a dos. La longitud se calcula

con el factor de turbulencia propuesto en la literatura, por el área transversal y la profundidad del canal (American Petroleum Institute, 1990).

En las figuras 2.2, 2.3 y 2.4 se pueden apreciar la planta, las secciones típicas y la perspectiva de un separador API respectivamente.

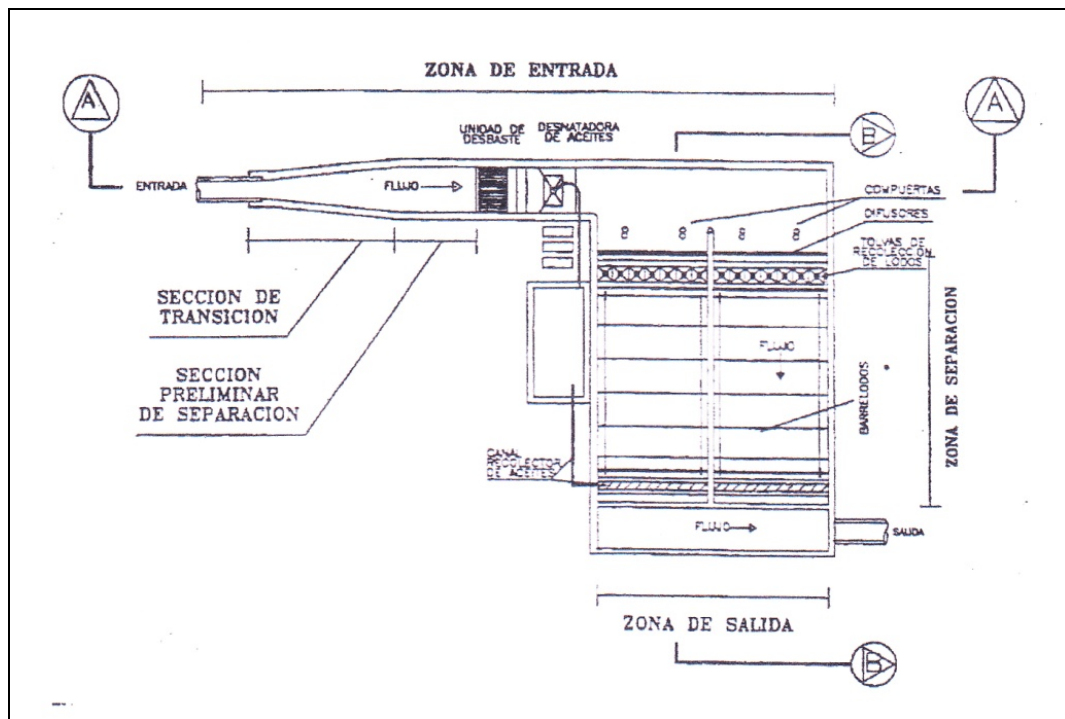


Figura 2.2 Planta de un separador API (PDVSA, 1999).

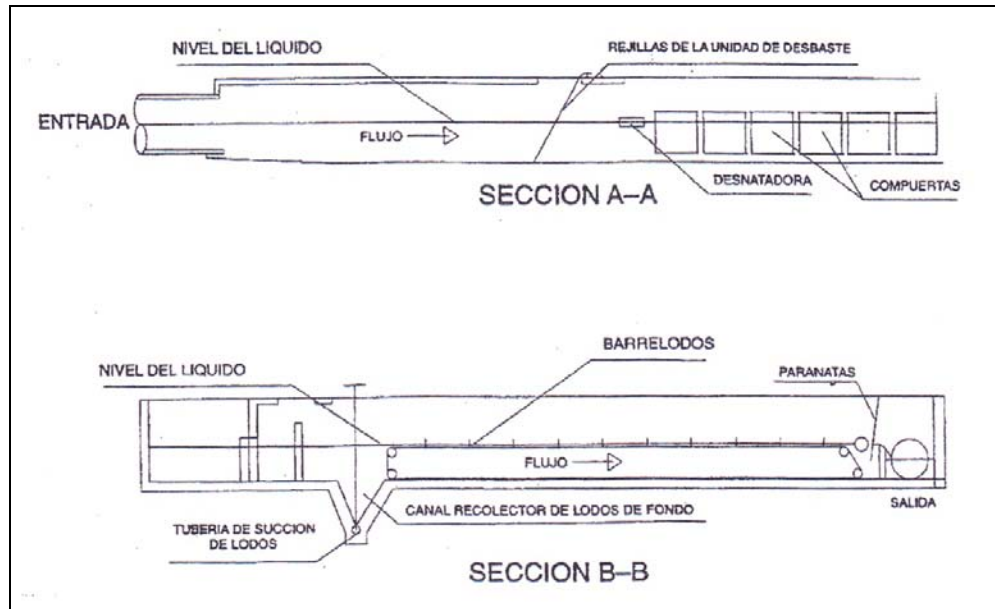


Figura 2.3 Secciones típicas de un separador API (PDVSA, 1999).

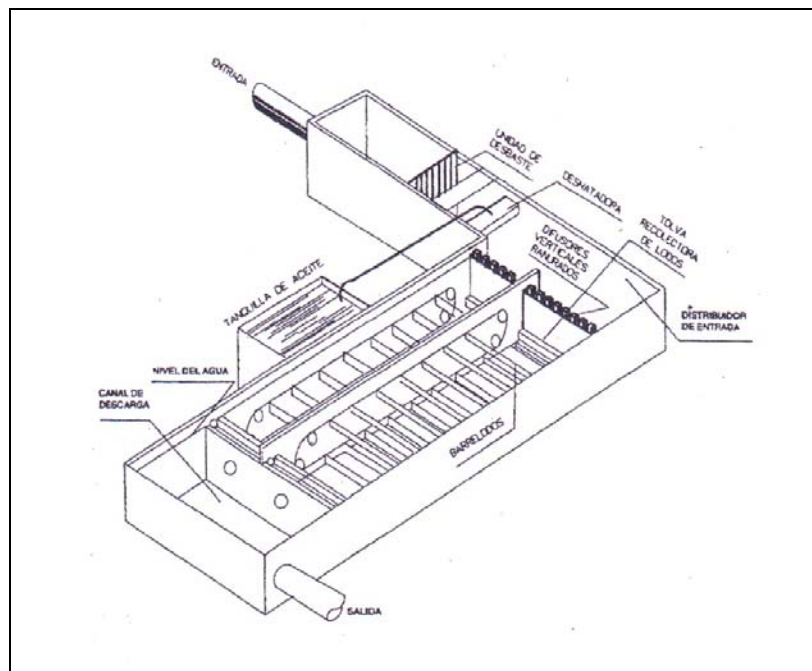
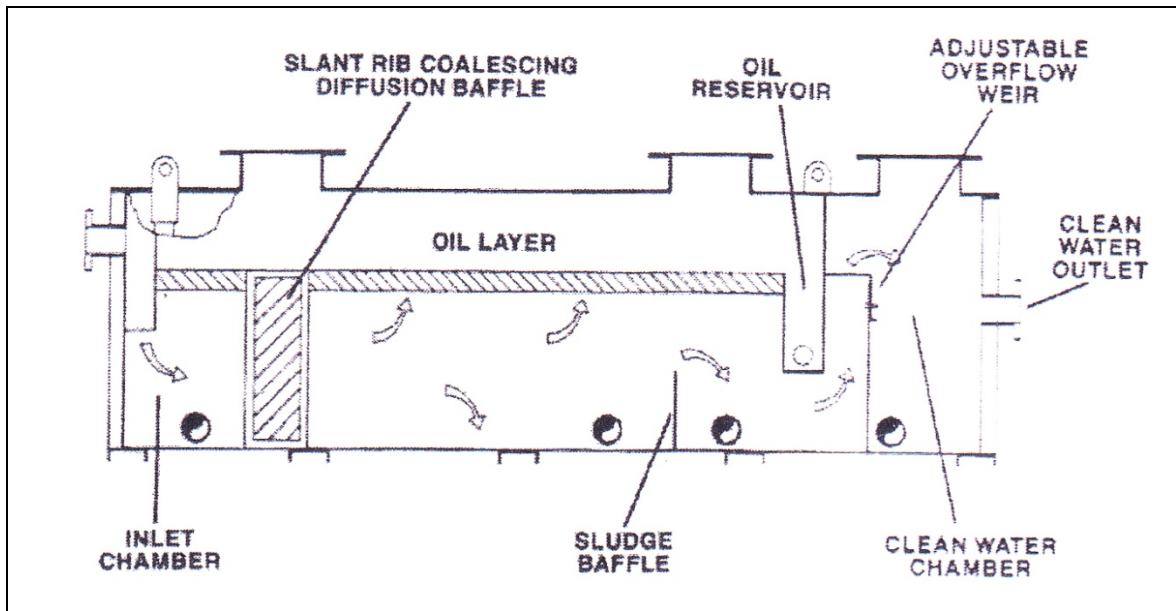


Figura 2.4 Perspectiva de un separador API (PDVSA, 1999).

En la figura 2.5 se muestra el esquema de un separador API desarrollado por Great Lakes Environmental Inc., el cual de acuerdo a sus fabricantes tiene gran eficiencia para remover lodos aceitosos o sólidos pesados, donde se requieren grandes tiempos de retención.



**Figura 2.5 Esquema de separador API (PDVSA, 1999).**

#### **2.4.4 Otros modelos de separadores por gravedad**

La variedad de separadores por gravedad es limitada, pueden existir rectangulares o circulares, aunque todos cumplen el mismo propósito de separar el crudo del agua:

- Separador de placas paralelas (PPI): se diseñó posterior al separador API, su desarrollo pretendía minimizar las deficiencias de espacio y costos, entre otros. Su diseño consiste en la colocación de placas paralelas, con un ángulo de 45°, en el interior del separador.
- Separador de placas corrugadas (CPI): su diseño fue desarrollado por la Compañía Shell. A diferencia del separador API contiene internos que

facilitan la separación del crudo mejorando la calidad del agua de salida. El diseño interior utiliza una serie de placas corrugadas montadas una sobre la otra paralelamente en un armazón con inclinación entre 45 y 60°. Cada placa contiene canales cóncavos y crestas o picos.

- Separadores de flujo cruzado (CFI): en 1960, bajo dos licencias Pielkenrood Vinitex y Environmental Engineering de Australia, se diseñó el separador con interceptores de flujo cruzado CFI. La finalidad de este nuevo diseño apuntaba a mejorar algunos problemas detectados en el uso de los separadores PPI y CPI.

## 2.5 ANÁLISIS HIDRÁULICO

### 2.5.1 Flujo en tuberías: laminar y turbulento

El régimen de flujo existente depende del diámetro de la tubería, de la densidad y la viscosidad del fluido y de la velocidad del flujo. Luego, el régimen de flujo se caracteriza por el número de Reynolds, término adimensional que relaciona las fuerzas dinámicas de la masa del fluido respecto a los esfuerzos de deformación ocasionados por la viscosidad (Crane, 1992).

$$Re = \frac{D \times v \times \rho}{\mu} \quad (\text{Ec. 2.1})$$

Donde:

D = diámetro interno [m].

v = velocidad del fluido [m/s].

$\rho$  = densidad del fluido [ $\text{kg/m}^3$ ].

$\mu$  = viscosidad del fluido [ $\text{Pa}\cdot\text{s/m}^2$ ].

Usualmente, el flujo en tuberías se considera como laminar si el número de Reynolds es menor que 2.100 y turbulento si es superior a 4.000. Entre estos dos valores está la zona denominada zona crítica en donde el régimen de flujo es impredecible, pudiendo ser laminar, turbulento o de transición, dependiendo de muchas condiciones con posibilidad de variación (PDVSA, 1994).

### 2.5.2 Teorema de Bernoulli

El teorema de Bernoulli es una forma de expresión de la aplicación de la ley de la conservación de la energía al flujo de fluidos de una tubería. La energía total en un punto cualquiera por encima de un plano horizontal arbitrario fijado como referencia, es igual a la suma de la altura geométrica, la altura debida a la presión y la altura debida a la velocidad (PDVSA, 1994).

$$Z + \frac{F_4 \times P \times g_c}{\rho \times g} + \frac{v^2}{2 \times g} = H \quad (\text{Ec. 2.2})$$

Donde:

H = cabezal de la bomba [m].

Z = altura o elevación potencial sobre el nivel de referencia [m].

P = presión manométrica [Pa].

F<sub>4</sub> = factor que depende de las unidades usadas [SI 1].

g = aceleración de la gravedad [m/s<sup>2</sup>].

g<sub>c</sub> = constante dimensional [10<sup>3</sup> kg/(kPa.m.s<sup>2</sup>)].

ρ = densidad del fluido [kg/m<sup>3</sup>].

v = velocidad del fluido [m/s].

Si las pérdidas por rozamiento se desprecian y no se aporta o se toma ninguna energía del sistema de tuberías (bombas o turbinas), la altura total H en la ecuación anterior permanecerá constante para cualquier punto del

fluido. Sin embargo en la realidad existen pérdidas o incrementos de energía que deben incluirse en la ecuación de Bernoulli.

### 2.5.3 Factor de fricción

Este término sin dimensiones refleja la resistencia ofrecida por las paredes del tubo al movimiento del fluido. Este factor debe ser determinado experimentalmente u obtenido mediante formulas empíricas.

Si el flujo es laminar ( $Re < 2.100$ ), el factor de fricción puede determinarse a partir de la ecuación (PDVSA, 1994):

$$f = \frac{64}{Re} \quad (\text{Ec. 2.3})$$

Donde:

f = factor de fricción.

Re = número de Reynolds.

Si el flujo es turbulento ( $Re > 4.100$ ), el factor de fricción puede determinarse por la ecuación empírica de Colebrook (PDVSA, 1994):

$$f = 4 \times \left[ -3,6 \times \log \left[ \left( \frac{6,9}{Re} \right) + \left( \frac{\epsilon/d}{3,7} \right)^{1,11} \right] \right]^{-2} \quad (\text{Ec. 2.4})$$

Donde:

f = factor de fricción.

Re = numero de Reynolds.

$\epsilon/d$  = rugosidad relativa.

### 2.5.4 Pérdidas por fricción

Las pérdidas por fricción en un sistema de tuberías es un parámetro que interviene en los cálculos de un sistema de bombeo, e incluye las pérdidas a la entrada y salida del recipiente, válvulas, equipos y accesorios.

Las pérdidas totales por fricción vienen dadas por la siguiente ecuación (PDVSA, 1994):

$$h_f = h_L + h_A \quad (\text{Ec. 2.5})$$

Donde:

$h_f$  = pérdidas totales [m].

$h_L$  = pérdidas por longitud de tubería [m].

$h_A$  = pérdidas por accesorios [m].

#### 2.5.4.1 Pérdidas por longitud de tubería

Para determinar las pérdidas locales en tramos rectos se usa la siguiente ecuación (PDVSA, 1994):

$$h_L = f \times \frac{L}{D} \times \frac{v^2}{2 \times g} \quad (\text{Ec. 2.6})$$

Donde:

$h_L$  = pérdidas por longitud de tubería [m].

$L$  = longitud de tramo [m].

$D$  = diámetro [m].

$f$  = factor de fricción.

$g$  = aceleración de la gravedad [ $\text{m/s}^2$ ].

$v$  = velocidad del fluido [m/s].



### 2.5.4.2 Pérdidas por accesorios

Las pérdidas menores o secundarias son aquellas producidas por los accesorios que necesariamente se deben de colocar en las tuberías, para que estas puedan realizar funciones específicas, tales como (PDVSA, 1994):

- Desviaciones en 90 y 45°.
- Corte de flujo (válvulas).
- Regulación de presión o caudal (válvulas de regulación, placas orificio, etc.).
- Purificación del fluido (filtros, retenedores, etc.).
- División de flujos
- Entre otros.

Las pérdidas por accesorios se calculan a partir de la siguiente ecuación (PDVSA, 1994):

$$h_A = K_t \times \frac{v^2}{2 \times g} \quad (\text{Ec. 2.7})$$

Donde:

$h_A$  = pérdidas por accesorios [m].

$K_t$  = constante de las pérdidas por accesorio.

$g$  = aceleración de la gravedad [m/s].

$v$  = velocidad del fluido [m/s].

La constante  $K_t$  relaciona las pérdidas por accesorios que existen en la tubería, cada accesorio tiene un  $K$  determinado que depende del factor de fricción. Algunas relaciones para el cálculo de  $K$  en diferentes accesorios se presentan en la tabla 2.1 (Crane, 1992).

**Tabla 2.1 Accesorios y su relación de K correspondiente.**

Accesorio	K
Codo estándar 90°	30 x f
Codo estándar 45°	16 x f
Conexión estándar "T" flujo directo	20 x f
Conexión estándar "T" flujo desviado a 90°	60 x f
Válvula de compuerta	8 x f
Válvula check	50 x f
Válvula pie	75 x f
Válvula de globo	340 x f

El valor de  $K_t$  será la sumatoria de los K de los distintos accesorios.

### 2.5.5 Cabezal de la bomba

Es la cantidad de energía que la bomba debe ser capaz de suministrar a cada unidad de masa del líquido. Por conversión en presión se define como requerimiento de cabezal porque las unidades de energía de entrada son equivalentes a la de una columna de líquido.

El cálculo de energía que requiere el fluido, se desarrolla por medio de la ecuación de Bernoulli (McNaughton, 1990):

$$H_{sist} = F_4 \times \frac{g_w}{g} \times \left( \frac{P_2}{\rho_2} - \frac{P_1}{\rho_1} \right) + (Z_2 - Z_1) + \frac{(v_2^2 - v_1^2)}{2 \times g} + H_{ftotal} \quad (\text{Ec. 2.8})$$

Donde:

$H_{sist}$  = cabezal total [m].

$H_{ftotal}$  = pérdidas por fricción total del sistema [m].

$P_2, P_1$  = presión en el punto 2 y el punto 1, respectivamente [kPa].

$v_2, v_1$  = velocidad en el punto 2 y el punto 1, respectivamente [m/s].

$Z_2, Z_1$  = altura en el punto 2 y el punto 1, respectivamente [m].

$g$  = aceleración de la gravedad [ $m/s^2$ ].

$g_c$  = constante dimensional [ $10^3 \text{ kg}/(\text{kPa}\cdot\text{m}\cdot\text{s}^2)$ ].

$\rho$  = densidad del fluido [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ].

$F_4$  = factor que depende de las unidades [SI 1].

## 2.6 LODOS RESIDUALES

El lodo es un subproducto de la mayoría de los procesos de aguas residuales, cuya disposición se realiza generalmente mediante vertimiento a la tierra, incineración, vertido al mar, entre otros, dependiendo de su procedencia. El lodo procedente de tratamiento de aguas residuales por ejemplo, suele ser valioso como fuente de nutrientes y como acondicionador de suelos y puede emplearse en agricultura, entre otros usos. El lodo residual de plantas industriales depende mucho del tipo de proceso donde se haya utilizado el agua, con qué tipo de compuestos y sustancias químicas hayan tenido reacción o contacto, en qué tipo de proceso se haya utilizado aguas abajo de la planta de tratamiento y qué tipo de sustancias químicas se apliquen al tratamiento primario, secundario o avanzado (La Greca, Buckingham, Evans, 1996).

### 2.6.1 Lodos primarios y secundarios de aguas residuales

La operación unitaria más frecuente en aguas residuales es la sedimentación primaria para separar los sólidos sedimentables que se puedan espesar por decantación gravitatoria.

El lodo consiste en sólidos inorgánicos, arenas y finos orgánicos. Como contiene materia orgánica, es adecuado para una posterior digestión anaeróbica. El espesado posterior se produce en los espesadores de varilla u otros, seguido de estabilización y deshidratación.

Los lodos secundarios son esencialmente biológicos, resultado de la conversión de los residuos solubles del efluente primario. Se produce como los lodos en exceso de los clarificadores secundarios, después de algún proceso de tratamiento secundario, tales como lodos activados, filtros percoladores y variaciones de estas operaciones unitarias.

En caso de falla de materia orgánica, los lodos secundarios son menos adecuados para digestión anaeróbica.

Los lodos mixtos es la combinación de los primarios y secundarios, éstos se usan a veces para que las propiedades de fácil deshidratación de los primeros ayuden en la deshidratación de los lodos secundarios.

Los lodos químicos se producen cuando se añade cal o sales de aluminio o hierro, etc., para mejorar la separación de sólidos en suspensión o para precipitar químicamente el fósforo. Los lodos de tratamiento de agua potable son lodos químicos. Aunque algunos reactivos pueden ser beneficiosos para la deshidratación (cal), otros inhiben la deshidratación (Gerad, 1999).

### **2.6.2 Primera etapa de tratamiento de lodos**

Los pasos de tratamiento de la primera etapa son (Gerad, 1999):

- Acondicionamiento.
- Espesado.
- Deshidratación.
- Estabilización.

El objetivo del tratamiento en primera etapa es reducir el volumen de lodo mediante reducción del volumen de agua. El agua entre los lodos puede ser:

- Agua capilar libre.
- Agua ligada.

### **2.6.3 Segunda etapa de tratamiento de lodos**

Después del acondicionamiento, espesado y deshidratación, se encuentra la segunda etapa de tratamiento de lodos, la cual implica el uso de alguna tecnología para (Gerad, 1999):

- Digestión anaeróbica.
- Digestión aeróbica.
- Compostaje (en capas y en cámaras cerradas).
- Incineración.
- Pirolisis.
- Gasificación.
- Oxidación en aire húmedo.
- Fusión de lodos.

### **2.6.4 Evacuación de lodos**

Los lodos producidos en las plantas depuradoras convencionales son sólidos secos desde un 0,5 a un 90 % seco. Las vías de evacuación de los lodos pueden ser las siguientes (Gerad, 1999):

- Vertido al mar.
- Incineración.
- Aplicación al terreno.
- Inyección al suelo.
- Revegetación de terrenos.
- Recuperación de terrenos (después del mezclado).
- Recuperación de terrenos (desde el mar).
- Extensión sobre terrenos en bosques.
- Vertido (evacuación conjunta).
- Vertido (simple uso, sólo lodos).

### 2.6.5 Deshidratación de lodos

La deshidratación de lodos consiste en una operación unitaria física utilizada para reducir el contenido de humedad del lodo, debido a alguna o por varias de las siguientes razones:

- Los costos de transporte del lodo por camión hasta el lugar de su evacuación final son notablemente menores cuando se reduce su volumen por deshidratación.
- El lodo deshidratado es generalmente más fácil de manipular que el lodo líquido o espesado. Los lodos deshidratados tienen la ventaja de poder ser manipulados con tractores o maquinarias provistas de palas o cintas transportadoras.
- La deshidratación del lodo suele ser necesaria antes de su incineración para aumentar su poder calorífico, eliminando el exceso de humedad.
- La deshidratación es necesaria antes del compostaje para reducir la cantidad de material de enmienda o soporte.
- En algunos casos, puede ser necesario eliminar el exceso de humedad para evitar la generación de olores y que el lodo pueda pudrirse.
- La deshidratación del lodo suele ser necesaria antes de su evacuación a vertederos controlados para reducir la producción de lixiviados en la zona de vertedero.

Una clasificación general de algunos métodos para la deshidratación de lodos se muestra a continuación:

- Estáticos: lechos de secado y lagunas.
- Mecánicos: deshidratador centrífugo, filtro prensa, filtro banda y filtro de vacío.

### **2.6.5.1 Lecho de secado (arena)**

Los lechos de arena constituyen uno de los métodos más utilizados para deshidratar lodos provenientes de plantas de tratamiento de aguas, tanto urbanas como industriales, debido a que es método más simple y económico. A grandes rasgos, consisten en una capa de grava la cual es cubierta por una capa uniforme de arena, por debajo de estas dos capas se coloca un sistema de drenaje para producir un filtrado efectivo.

Dichos lodos pueden ser secados en lechos al aire libre o cubiertos. El método es muy sencillo y requiere una atención mínima del operador. Sin embargo, es necesaria una gran cantidad de terreno y son susceptibles a variables incontrolables como lluvia, temperatura ambiental, humedad y velocidad de desaguado. También provocan problemas de olores, los cuales aumentan conforme se incrementa la producción de lodos. En contraparte, los lechos de secado son menos complejos, más fáciles de operar y requieren menos energía operacional que los sistemas de secado mecánicos. Producen fácilmente una torta de lodo con aproximadamente 25 – 40% de sólidos, cuyo porcentaje puede incrementarse hasta un 60% con tiempo de secado adicional.

Para el diseño y construcción de lechos de secado se recomienda (Eckenfelder, Wesley, 2000):

- Los lechos de secado pueden ser constituido de mampostería, de hormigón o de tierra (con diques), en forma de tanque con una profundidad útil de 50 a 80 cm y un ancho variable entre 3 a 6 m, pero puede sobrepasar los 10 m.
- Fijar el espesor de la capa de lodo entre 20 a 25 cm para obtener un secado rápido.
- El lecho puede constituirse de tres o dos camadas (medio filtrante) de material de diferente granulometría, arriba la camada de material más fino

con un espesor de 20 cm, siendo arena con un tamaño efectivo de 0,3 a 1,3 mm y un coeficiente de uniformidad entre 2 a 5, mientras, abajo la camada de material más grueso con un espesor de 30 cm, siendo grava con un diámetro entre 1,6 a 51 mm.

- La superficie de la arena puede ser protegida contra pérdidas por adhesión al lodo seco, empleándose ladrillos con juntas abiertas, con 4 a 10 cm de ancho, rellenos con arena y con una separación de 2 a 3 cm.
- La superficie del lecho de secado en general es levemente inclinada longitudinalmente para que el lodo se distribuya rápidamente debido a las cargas.
- El fondo del lecho generalmente es el propio suelo, a veces es revestido con una camada de hormigón simple con una pendiente hacia el canal central de drenaje. En el fondo se coloca una línea de drenaje constituida por tubos cerámicos perforados o una tubería de PVC de 10 cm (4 pulg) de diámetro perforada con orificios de 2,5 cm (1 pulg) de diámetro para recolectar el agua filtrada.
- Los lechos de secado pueden estar cubiertos con un techo consistente en una lamina delgada de polietileno transparente que permita el paso de los rayos solares pero impide el ingreso de aguas de lluvia.

Tomando en cuenta el volumen de lodo a secar y el espesor de la capa de lodo a aplicar se puede calcular el área superficial requerida para el lecho de secado con la siguiente ecuación:

$$A_{LS} = \frac{V_L}{H_{AL}} \quad (\text{Ec. 2.9})$$

Donde:

$A_{LS}$  = área del lecho de secado [ $\text{m}^2$ ].

$V_L$  = volumen de lodo a secar [m].

$H_{AL}$  = profundidad de aplicación del lodo (0,20 a 0,25 m) [m].



En el cálculo del volumen de capa necesario de arena y grava de las camadas del lecho de secado se puede usar la siguiente ecuación:

$$V_C = N \times H_C \times A_{LS} \quad (\text{Ec. 2.10})$$

Donde:

$V_C$  = Volumen de camada [ $m^3$ ].

$N$  = número de camada.

$H_C$  = profundidad de la camada (0,20 m arena y 0,30 m grava) [m].

$A_{LS}$  = área del lecho de secado [ $m^2$ ].

## 2.7 ECONOMÍA

### 2.7.1 Economía ambiental

La economía ambiental trata el estudio de los problemas ambientales con la perspectiva e ideas analíticas de la economía. Se pudo haber pensado que la economía se ocupa en su mayor parte de decisiones de negocios y de cómo obtener rendimientos en un sistema capitalista. Este no es el caso. La economía es, más bien, el estudio de cómo y por qué las personas, bien sean consumidores, firmas, organizaciones sin ánimo de lucro o agencias gubernamentales, toman decisiones sobre el uso de recursos valiosos.

La economía se divide en microeconomía, la cual estudia el comportamiento de los individuos o pequeños grupos, y en macroeconomía, que se concentra en el análisis del desempeño económico de las economías como un todo.

La economía ambiental se sitúa en los dos campos, pero sobre todo en la microeconomía. Se concentra en cómo y por qué las personas toman decisiones que tienen consecuencias ambientales. Además, se ocupa de

estudiar las maneras en cómo se pueden cambiar las políticas e instituciones económicas con el propósito de equilibrar un poco mas esos impactos ambientales con los deseos humanos y las necesidades del ecosistema en sí mismo.

En la economía ambiental es común contar con diversos tipos de análisis ambiental, entre ellos tenemos (Field, 1995):

- Análisis costo-efectividad: es simplemente un análisis en el cual se observa la manera más económica de lograr un objetivo determinado de calidad ambiental o, expresándolo en términos equivalentes, de lograr el máximo mejoramiento de cierto objetivo ambiental para un gasto determinado de recursos.
- Análisis costo-beneficio: los economistas se interesan sólo de los costos para alcanzar determinada meta ambiental. Tanto los costos como los beneficios de una política o programa se miden y se expresan en términos comparables.

### **2.7.2 Evaluación económica**

Las evaluaciones económicas son utilizadas, fundamentalmente, para la toma de decisiones gerenciales, ya que son ellas quienes determinan si continuar con el desarrollo de un proyecto o cancelarlo a pesar de que sea técnicamente viable, por tal motivo es sumamente importante realizar un estimado de costo de calidad que garantice la decisión más acertada posible. Los estimados de costos sirven de base a la gerencia de proyectos para (PDVSA, 2001):

- Evaluación de factibilidad en su fase conceptual.
- Análisis de rentabilidad económica.
- Selección de opciones entre diversas alternativas de inversión.
- Aprobación presupuestaria.

- Definición de estrategias de financiamiento.
- Comparación de ofertas en las licitaciones.

En sus fases iniciales, el estimado de costo tiene un alto grado de indefinición porque los factores de diseño considerados para su elaboración son escasos o muy generales; y es a medida que se establecen los lineamientos técnicos que la información manejada es más precisa y por ende dicho nivel de indefinición disminuye. Esto no implica que no se puedan tomar decisiones tempranas en cuanto al curso de un proyecto, sino que dependiendo de la fase en que este se encuentre, la resolución a tomar tiene un mayor o menor grado de incertidumbre.

La clasificación de los estimados de costos depende de los objetivos, etapas del proyecto en los cuales se elaboran, información requerida, métodos de estimación, precisión y confiabilidad de los mismos. Estos se pueden clasificar en cinco tipos: V, IV, III y II llamados estimados presupuestarios y clase I llamados estimados de licitación. En la tabla 2.2 se presentan los elementos que se necesitan según el estimado que se desee hacer, así como también el error asociado a cada uno de ellos.

**Tabla 2.2 Clasificación de los estimados de costos (PDVSA, 2001).**

Tipo de estimado	Información requerida	% de desv.
Clase V (orden de magnitud)	Tipo de proyecto, tamaño, posible ubicación, capacidad, especificación general de los insumos y productos. Se basa en datos previos sobre costos similares, teniendo en cuenta detalles de diseño y haciendo los ajustes correspondientes.	± 50
Clase IV (conceptual)	Está basado en la definición de unidades de procesamiento principales o bien de secciones importantes de dichas unidades; así como también en los diagramas de flujo generales.	± 30
Clase III (preliminar)	Se basa en el diseño preliminar de equipos básicos, incluyendo además algunas especificaciones de diseño y el uso de curvas de inversión.	± 20
Clase II (definitivo)	Las especificaciones completas de los principales componentes de los equipos, edificios, requerimientos de almacenaje, etc.; en lo que respecta a tamaño, detalles críticos de diseño, materiales de construcción, distribución física, etc.	± 10
Clase I (control)	Se basa en el diseño completo de fundaciones, estructuras, despliegues de líneas y tuberías; y los cálculos métricos de los materiales de construcción.	± 5

## **CAPÍTULO 3**

### **DESARROLLO DEL TRABAJO**

#### **3.1 RECOPIACIÓN DE LOS PARÁMETROS FÍSICOQUÍMICOS DE LOS EFLUENTES DE LOS SISTEMAS**

Los sistemas de tratamiento de aguas aceitosas (API) presentan como afluente agua aceitosa y como efluentes hidrocarburos recuperados, aguas clarificadas y lodos aceitosos; para apreciar el comportamiento del afluente y los efluentes se recopilaron los informes de resultados de los análisis físicoquímicos realizados trimestralmente desde la puesta en marcha de los sistemas por el laboratorio externo autorizado por el Ministerio del Poder Popular para el Ambiente (MPPA) Hidrolab Toro Consultores, CA, informes existentes en los archivos del departamento de Dirección de Ambiente.

##### **3.1.1 Parámetros físicoquímicos del afluente y los efluentes de los sistemas**

Los parámetros recopilados para el agua aceitosa y el agua clarificada son: T, color, DBO, DQO, aceites y grasas minerales e hidrocarburos (AGMH), nitrógeno total (NT), fósforo total (FT), sulfuros, fluoruros, fenoles y coliformes totales (CT), valores presentados en las tablas 3.1 y 3.2 para Equipo Liviano y A.1 y A.2 para Equipo Pesado.

**Tabla 3.1 Parámetros fisicoquímicos del afluyente del sistema de Equipo Liviano.**

Trimestre	T [°C]	pH [Adim.]	Color [Unid. Pt Co]	DBO [mg/l]	DQO [mg/l]	AGM H [mg/l]	NT [mg/l]	FT [mg/l]	Sulfuros [mg/l]	Fluoruros [mg/l]	Fenoles [mg/l]	CT [NMP / 100ml]
2°-2005	34	9,88	300	58	257	9	9,97	0,23	6	0,35	0,04	200
3°-2005	34	8,75	20	58	458	57	9	0,48	0,36	2,46	0,05	400
1°-2006	30	9,02	50	157	424	3	6	0,19	2,33	3,32	0,08	200
2°-2006	30	8,51	50	119	416	6	8	0,01	2,81	0,01	0,11	400
3°-2006	39	7,62	20	307	854	53	4	0,08	3,86	2,25	0,04	4750
4°-2006	28	7,66	30	216	612	16	8	0,2	0,85	2,25	0,1	3500
1°-2007	28	7,21	10	40	204	3	5	0,04	0,28	2,2	0,05	4500
2°-2007	28	8,06	30	55	195	4	9	0,89	0,84	1,35	0,01	200
3°-2007	38	7,94	20	149	404	5	32	0,05	5,65	0,01	0,07	200
4°-2007	29	7,08	40	90	232	4	12	0,09	0,35	5,33	0,07	200
1°-2008	37	7,89	40	12	96	1	3	0,01	0,15	0,33	0,05	4390
2°-2008	30	8,32	50	71	245	13	3	0,01	0,43	0,1	0,21	200
3°-2008	33	8,1	20	25	66	2	2	0,11	0,44	0,1	0,03	200
4°-2008	28	8,8	5	126	151	3	14	0,47	0,55	0,1	0,18	200
1°-2009	28	8,5	30	216	450	14	39	2,17	0,07	1	0,05	900
2°-2009	28	11,98	10	193	418	62	48	3,73	4,42	1	0,01	1500
3°-2009	30	8,66	10	158	754	18	3	0,24	0,01	0,23	0,06	900

**Tabla 3.2 Parámetros fisicoquímicos del agua clarificada del sistema de Equipo Liviano.**

Trimestre	T [°C]	pH [Adim.]	Color [Unid. Pt Co]	DBO [mg/l]	DQO [mg/l]	AGMH [mg/l]	NT [mg/l]	FT [mg/l]	Sulfuros [mg/l]	Fluoruros [mg/l]	Fenoles [mg/l]	CT [NMP / 100ml]
2°-2005	30	7,92	100	14	99	7	3,15	0,37	0,29	0,6	0,01	200
3°-2005	31	7,6	20	4	95	7	5	0,58	0,02	1,49	0,03	230
1°-2006	30	7,95	50	40	134	1	3	0,2	1,62	1,55	0,01	200
2°-2006	30	7,66	50	31	65	1	3	0,01	0,4	0,01	0,01	200
3°-2006	31	8,01	10	48	146	5	3	0,06	0,12	1	0,03	700
4°-2006	30	7,97	20	45	127	7	6	0,15	0,19	1,2	0,01	200
1°-2007	30	7,15	10	35	127	1	4	0,01	0,17	1,1	0,01	200
2°-2007	29	7,99	20	31	65	0,1	0,1	0,33	0,05	0,3	0,01	200
3°-2007	30	7,74	5	44	120	1	16	0,1	2,17	0,1	0,08	200
4°-2007	29	7,71	10	43	126	2	1	0,21	0,12	3,46	0,03	200
1°-2008	31	7,74	10	7	90	0,6	4	0,28	0,26	0,69	0,05	900
2°-2008	30	7,8	50	40	161	7	1	0,07	0,95	0,1	0,08	930
3°-2008	30	7,5	25	20	63	1,4	1	0,05	0,48	0,1	0,03	200
4°-2008	28	7,92	10	44	103	2	12	0,72	0,17	0,1	0,02	200
1°-2009	30	7,2	25	33	114	11	18	0,68	0,45	0,44	0,01	900
2°-2009	29	9	25	36	89	1	6	0,22	2,5	1	0,04	900
3°-2009	31	8,12	20	15	92	3	1	0,06	0,01	0,1	0,01	700

En el caso del parámetro sólidos suspendidos totales (SST) que no se contempla en el análisis trimestral, la Dirección de Ambiente solicitó a Hidrolab Toro analizar dicho parámetro para el trimestre 3°-2009 y además que los puntos de muestra tanto para los SST como AGMH se realizaron a la entrada del desarenador, a la entrada del separador API y a la entrada del tanque de aguas clarificadas. Estos valores se encuentran en las tablas 3.3 y A.3 para Equipo Liviano y Equipo Pesado respectivamente.

**Tabla 3.3 Parámetros físicos puntuales en el sistema de Equipo Liviano.**

Parámetro	Unidad	Entrada desarenador	Entrada separador API	Entrada tanque aguas clarif.
AGMH	[mg/l]	18,00	16,56	3,00
SST	[mg/l]	400,35	66,67	10,00

Con respecto a los lodos aceitosos, sólo se cuenta con un informe de resultado de análisis realizado por Hidrolab Toro, donde se analizan las características de peligrosidad, características de metales y características en el lixiviado. Estos valores se presentan en las tablas 3.4, 3.5 y 3.6 para el sistema del área de Equipo Liviano y las tablas A.4, A.5 y A.6 para el sistema del área de Equipo Pesado.

**Tabla 3.4 Características de peligrosidad de los lodos aceitosos de Equipo Liviano (Hidrolab Toro, 2009).**

Parámetros	Unidad	Muestra	Valor reglamentado
Corrosividad (pH)	Adim.	12,28	$\leq 2$ ó $\geq 12,5$ Corrosivo
Punto de inflamación	[°C]	> 250	< 60,5 Inflamable
Reactividad al ácido sulfhídrico (H <sub>2</sub> S)	[mg/kg]	< 0,10	500 *
Reactividad al ácido cianhídrico (HCN)	[mg/kg]	< 0,10	250 *

Valor reglamentado según Gaceta Oficial N° 5.245, Decreto N° 2.635.

\* Según Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (USEPA).



**Tabla 3.5 Características de metales presentes en los lodos aceitosos de Equipo Liviano (Hidrolab Toro, 2009).**

Parámetros	Unidad	Muestra	Valor reglamentado
Cadmio y sus compuestos	mg/kg Cd	1,08	< 50
Cobre compuestos solubles (sales y ácidos)	mg/kg Cu	16,93	< 1000
Cromo y sus compuestos	mg/kg Cr	11,13	< 50
Plomo y sus compuestos (sales y óxidos)	mg/kg Pb	16,58	< 1000
Níquel y sus compuestos (sales y óxidos)	mg/kg Ni	16,98	< 1000
Cinc y sus compuestos (polvos, sales y óxidos)	mg/kg Zn	92,74	< 1000

Valor reglamentado según Gaceta Oficial N° 5.245, Decreto N° 2.635.

**Tabla 3.6 Características en lixiviado presentes en los lodos aceitosos de Equipo Liviano (Hidrolab Toro, 2009).**

Parámetros	Unidad	Muestra	Valor reglamentado
Cadmio (Cd)	mg/l	< 0,01	1,00
Cromo hexavalente (Cr <sup>+6</sup> )	mg/l	< 0,01	5,00
Níquel (Ni)	mg/l	0,11	5,00
Plomo (Pb)	mg/l	0,09	5,00

Valor reglamentado según Gaceta Oficial N° 5.245, Decreto N° 2.635.

### 3.1.1.1 Promedio de los parámetros del afluente y los efluentes de los sistemas

Para el cálculo de los promedios de los parámetros se utilizó la siguiente ecuación:

$$X = \frac{1}{n} \sum x_i \quad (\text{Ec. 3.1})$$

Donde:

X = promedio aritmético.

$X_i$  = valor de un parámetro.

$n$  = número de parámetro.

Tomando como datos los valores de T del afluente del área de Equipo Liviano de la tabla 3.1 y sustituyendo en la ecuación 3.1, se tiene:

$$X = \frac{(34 + 34 + 30 + 30 + 39 + 28 + 28 + 28 + 38 + 29 + 37 + 30 + 33 + 28 + 28 + 28 + 30)^{\circ}\text{C}}{17}$$

$$X = 31,29 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

De forma análoga se realizó los cálculos de promedio para el resto de los parámetros fisicoquímicos del afluente y los efluentes tanto para Equipo Liviano como Equipo Pesado, los resultados se presentan en las tablas 4.1 y 4.2.

### 3.1.1.2 Desviación de los parámetros del afluente y los efluentes de los sistemas

En el cálculo de la desviación estándar se utilizó la siguiente ecuación:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum(X_i - X)^2}{(n - 1)}} \quad (\text{Ec. 3.2})$$

Donde:

$\sigma$  = desviación estándar.

$X$  = promedio aritmético.

$X_i$  = valor de un parámetro.

$n$  = número de parámetro.

Se sustituyeron los valores de T de la tabla 3.1 y el valor promedio de T de la tabla 4.1 ambos del afluente del área de Equipo Liviano en la ecuación 3.2, teniendo que:

$$\sigma = \sqrt{\frac{[2(2,71)^2 + 4(-1,29)^2 + (7,71)^2 + 6(-3,29)^2 + (6,71)^2 + (-2,29)^2 + (5,71)^2 + (1,71)^2]^\circ\text{C}^2}{(17 - 1)}}$$

$$\sigma = 3,80 \text{ }^\circ\text{C}$$

De igual forma se calculó la desviación para el resto de los parámetros fisicoquímicos recopilados y sus resultados se presentan en la las tablas 4.1 y 4.2.

### **3.2 COMPARACIÓN DE LAS VARIABLES DE OPERACIÓN CON LAS DE DISEÑO EN LOS EQUIPOS DE LOS SISTEMAS**

Para la verificación del diseño y funcionamiento de las unidades se procedió a recopilar los datos de las variables de diseño de las unidades principales del sistema de tratamiento como lo son el desarenador y el separador API y se determinó o calculó los valores de las variables de operación actual.

#### **3.2.1 Caudales de las aguas aceitosas que ingresan a los sistemas**

Para la determinación del comportamiento característico de los caudales de entrada al desarenador y separador API de los sistemas, se recopilaron datos de los caudales correspondientes a veinte días de medición, registrado en dos turnos, mañana y tarde.

Los sistemas de tratamiento no tienen disponible un medidor de flujo para determinar el caudal de entrada. Sin embargo se pudieron realizar las

mediciones de caudal usando la tubería de entrada de aguas aceitosas del desarenador y del separador API.

### **3.2.1.1 Equipos y materiales**

- Beaker plástico de 5 litros de capacidad.
- Guantes de neopreno.
- Casco de seguridad.
- Bata de laboratorio.
- Cronómetro digital marca Casio 1/100.

### **3.2.1.2 Procedimiento**

- a. Se ubicó la tubería de entrada de aguas aceitosas al desarenador y separador API.
- b. En forma simultánea se introdujo el beaker debajo del flujo de entrada de agua aceitosa y se accionó el cronómetro, cuando se observó que en el beaker se leía un valor de 4 litros (valor que se fijó para todas las muestras) se detuvo el cronómetro y se chequeó la lectura emitida por el mismo. Una vez que la lectura emitida por el cronómetro se estabilizó, se procedió a registrar la lectura que más se reprodujo.
- c. Se repitieron los pasos a y b una vez en la mañana (am) y en la tarde (pm) por veinte días, tanto en el desarenador como en el separador API del sistema de tratamiento de aguas aceitosas (API) del area de Equipo Liviano y de Equipo Pesado. Estos valores se reportan en la tabla 3.7.

Con respecto a obtención los datos para la determinación de los caudales de entrada al tanque de aguas clarificadas y fosa de hidrocarburos recuperados de los sistemas de tratamiento de Equipo Liviano y Equipo Pesado, se utilizó los mismos materiales y procedimiento anterior, a excepción que el volumen fijado en la lectura del beaker fue de 2 l y que la cantidad de datos

registrados corresponden a una vez a la semana por ocho semanas. Estos datos se presentan en la tabla 3.8.

**Tabla 3.7 Tiempos recopilados a un volumen fijo de 4 l, en las entradas de aguas aceitosas a los sistemas.**

Día	Desarenador E. Liviano		Separador E. Liviano		Desarenador E. Pesado		Separador E. Pesado	
	t [s] (am)	t [s] (pm)	t [s] (am)	t [s] (pm)	t [s] (am)	t [s] (pm)	t [s] (am)	t [s] (pm)
1	5,50	4,30	6,40	5,85	4,10	4,96	5,37	5,66
2	6,15	2,45	7,77	4,89	3,85	4,99	4,37	5,60
3	4,78	1,96	5,89	2,47	6,37	2,24	9,16	3,52
4	3,27	5,59	4,86	7,00	6,01	5,27	7,57	6,97
5	6,61	7,09	8,30	9,95	3,57	4,75	4,80	4,99
6	8,69	6,78	10,11	8,80	5,11	2,74	6,23	2,98
7	2,01	2,28	2,58	3,00	4,84	4,37	5,69	4,89
8	2,85	2,07	3,60	2,79	5,67	2,97	7,89	3,38
9	2,73	2,93	3,89	3,23	4,33	1,89	4,91	2,24
10	3,83	3,78	4,60	4,24	3,46	3,79	3,98	4,00
11	1,62	1,69	1,99	2,99	1,64	2,21	1,87	3,17
12	3,77	5,00	4,02	5,81	4,16	3,44	5,58	4,61
13	1,72	2,67	1,94	3,82	4,23	4,70	5,00	4,99
14	3,63	2,63	3,99	2,99	2,31	2,72	3,76	2,94
15	10,03	12,33	10,58	12,90	6,08	6,37	6,23	4,12
16	2,63	6,01	4,47	7,96	7,45	8,23	9,94	10,23
17	2,43	3,75	2,93	4,99	4,66	3,27	5,12	4,27
18	4,57	1,78	6,62	2,59	2,76	5,00	3,99	6,74
19	4,21	4,55	4,80	5,30	3,50	2,00	5,89	3,77
20	3,00	5,35	3,89	6,01	10,09	12,21	10,27	12,45

**Tabla 3.8 Tiempos recopilados a un volumen fijo de 2 l, en la entrada de los tanques de aguas clarificadas y fosas de hidrocarburos recuperados de los sistemas.**

Día	Tanque aguas c. Equipo Liviano	Fosa hidrocarburos Equipo Liviano	Tanque aguas c. Equipo Pesado	Fosa hidrocarburos Equipo Pesado
	t [s]	t [s]	t [s]	t [s]
1	4,16	5,79	5,42	6,39
2	5,01	6,53	6,14	5,00
3	3,80	8,99	4,01	7,43
4	5,02	10,01	5,48	10,99
5	6,47	7,98	5,79	7,76
6	5,31	6,46	5,24	8,23
7	4,83	7,32	4,49	6,63
8	6,81	6,40	6,00	9,89

### 3.2.1.3 Cálculo del caudal de entrada a los sistemas

Para el cálculo del caudal de entrada se utilizó la siguiente ecuación:

$$Q = \frac{V}{t} \quad (\text{Ec. 3.3})$$

Donde:

Q = caudal [l/s].

V = volumen [l].

t = tiempo [s].

Tomando como datos los valores de tiempo (t) del desarenador del sistema de Equipo Liviano de la tabla 3.7 y sustituyendo en la ecuación 3.3, se tiene que:

$$Q = \frac{4\text{ l}}{5,50\text{ s}}$$

$$Q = 0,73 \frac{l}{s}$$

De forma análoga se realizó el cálculo del caudal para el resto de las mediciones y sus resultados se muestran en la tabla B.1 para la entrada a los sistemas y la tabla B.2 para la entrada al tanque de aguas clarificadas y fosa de hidrocarburos recuperados.

#### 3.2.1.4 Promedio del caudal de entrada a los sistemas

Para el cálculo de los promedios de los caudales de cada día se utilizó la siguiente ecuación:

$$Q_p = \frac{1}{n} \sum Q_i \quad (\text{Ec. 3.4})$$

Donde:

$Q_p$  = caudal promedio [l/s].

$Q_i$  = caudal puntual [l/s].

$n$  = número de caudal.

Se sustituyeron los valores de caudal a la entrada del desarenador del sistema de Equipo Liviano de la tabla B.1 en la ecuación 3.4, teniendo que:

$$Q_p = \frac{(0,73 + 0,93)l/s}{2}$$

$$Q_p = 0,83 \frac{l}{s}$$

De igual forma se calculó el promedio del caudal para el resto de los días y sus resultados se presentan en la tabla B.3 para la entrada a los sistemas y la tabla 4.3 para la entrada al tanque de aguas clarificadas y fosa de hidrocarburos recuperados.

Además se calculó el caudal promedio total para la entrada de aguas aceitosas al desarenador y al separador API tanto del sistema de Equipo Liviano como de Equipo Pesado; los resultados se presentan en las tablas 4.4, 4.5, 4.6 y 4.7.

### 3.2.2 Tiempo de retención hidráulico de las unidades de los sistemas

Para el cálculo del tiempo de retención hidráulico del desarenador y del separador API de cada sistema se utilizó la siguiente ecuación (Varsinca Ingenieros Consultores, 2004):

$$T_r = \frac{V}{Q} \quad (\text{Ec. 3.5})$$

Donde:

$T_r$  = tiempo de retención hidráulico [h].

$V$  = volumen real de la unidad [ $\text{m}^3$ ].

$Q$  = caudal [ $\text{m}^3/\text{h}$ ].

Tomando como datos el valor de caudal promedio total de la entrada al dearenador del sistema de Equipo Liviano y valor del volumen de dicho desarenador de la tabla 4.4 y sustituyendo en la ecuación 3.5, se tiene que:

$$T_r = \frac{4,40 \text{ m}^3}{4,39 \text{ m}^3/\text{h}}$$



$$T_r = 1,00 \text{ h}$$

De forma análoga se realizó el cálculo del tiempo de retención hidráulico para el resto de las unidades de los sistemas. Los resultados se presentan en las tablas 4.4, 4.5, 4.6 y 4.7 para las áreas de Equipo Liviano y Equipo Pesado.

### 3.2.3 Eficiencia de remoción de las unidades de los sistemas

Para la determinación de la eficiencia de remoción de aceites y grasas minerales e hidrocarburos (AGMH) y sólidos suspendidos totales (SST) tanto en el desarenador como en el separador API de los sistemas, se utilizó la siguiente ecuación:

$$E = \left( \frac{S_o - S}{S_o} \right) \times 100 \quad (\text{Ec. 3.6})$$

Donde:

E = eficiencia del proceso [%].

$S_o$  = concentración del sustrato en el afluente [mg/l].

S = concentración del sustrato en el efluente [mg/l].

Se sustituyeron los valores de SST del desarenador del sistema de Equipo Liviano de la tabla 3.3 en la ecuación 3.6, teniendo que:

$$E = \left( \frac{333,35 \text{ mg/l} - 66,67 \text{ mg/l}}{333,35 \text{ mg/l}} \right) \times 100$$

$$E = 80 \%$$

De esta manera se llevarán a cabo todos los cálculos correspondientes a la eficiencia de remoción de AGMH y SST de las unidades de los sistemas, los resultados se presentarán en las tablas 4.4, 4.5, 4.6 y 4.7.

Adicionalmente se realizó el cálculo de la eficiencia de remoción de AGMH cronológica desde la puesta en marcha de los sistemas, tomando como datos los valores de AGMH del afluente y efluente de los sistemas de las tablas 3.1, 3.2, A.1 y A.2. Los resultados se presentan en la tabla B.4 tanto para Equipo Liviano como Equipo Pesado.

### **3.2.4 Espesor de la capa de aceite e hidrocarburo**

En la determinación del comportamiento de la capa de aceite e hidrocarburo se recopilaron datos de los niveles de la capa en los separadores API de los sistemas, datos correspondientes a cinco días corridos de medición, en tres posiciones diferentes del separador, inicial, media y al final del separador que es la zona donde se recolecta los aceites e hidrocarburos por el desnatador.

#### **3.2.4.1 Equipos y materiales**

- Cinta de metal con plomada.
- Regla de 30 cm.
- Guantes de neopreno.
- Casco de seguridad.
- Bata de laboratorio.

#### **3.2.4.2 Sustancias**

- Pasta de encontrar agua, Kolor Kut (amarillo ocre).
- Nafta.

### 3.2.4.3 Procedimiento

- a. Se impregnó la crema Kolor Kut a lo largo de 20 a 25 cm en el extremo de la cinta a sumergirse.
- b. Los ensayos se realizaron en las posiciones inicial, media y final de cada separador.
- c. Se introdujo el extremo de la cinta lentamente, sin llegar a sobrepasar la extensión de la crema.
- d. Se levantó la cinta, se marcó la zona de la mancha de hidrocarburo superior (el último punto de la zona de la crema colorante que no se sumergió), removiendo el hidrocarburo de ese punto.
- e. Se vertió suavemente nafta para limpiar la mancha de hidrocarburo que se adherió al subir la cinta y permitiéndose así apreciar el cambio de color.
- f. Se midió la distancia entre el punto removido y el límite de cambio de coloración (la zona amarilla, pues la zona en contacto con el agua se torna roja o naranja). Se anotó la altura.
- g. En caso de no ocurrir cambio de color se repitió el procedimiento pero untando más crema a lo largo de la cinta.
- h. Se repitió esta prueba una vez al día por cinco días. Los datos se pueden apreciar en la tabla 3.9 para el sistema de Equipo Liviano y Equipo Pesado.

**Tabla 3.9 Espesor de la capa de aceite e hidrocarburo de los separadores API de los sistemas de las áreas de Equipo Liviano y Equipo Pesado.**

Día	Espesor de la capa E. Liviano [cm]			Espesor de la capa E. Pesado [cm]		
	Inicial	Media	Final	Inicial	Media	Final
1	1,0	1,8	3,0	0,8	1,4	2,3
2	1,3	2,5	4,1	1,0	2,0	3,3
3	2,2	3,8	5,9	1,4	2,6	4,1
4	3,2	5,1	7,7	2,0	3,2	5,0
5	4,1	6,2	9,0	3,1	4,6	6,9

### **3.3 PRESENTACIÓN DE PROPUESTA DE MEJORA A LOS MÉTODOS UTILIZADOS PARA LA DISPOSICIÓN DE LOS EFLUENTES**

#### **3.3.1 Método de disposición actual de las aguas clarificadas**

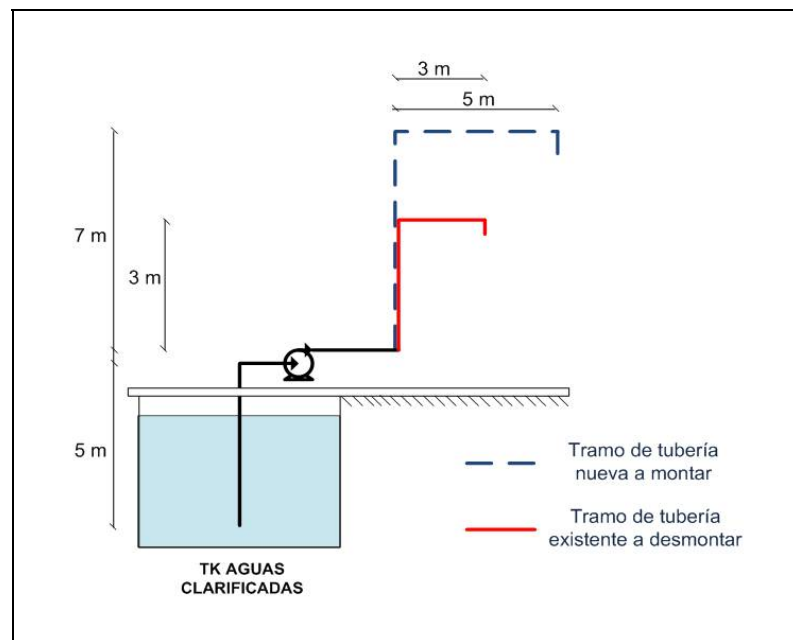
El agua clarificada se almacena en un tanque dotado con un sistema de llenado de camiones cisternas convencionales para cargarlo con agua clarificada a un caudal de 11 l/s, la frecuencia de llenado de cisterna es de dos veces por semana y se trata de mantener vacío el tanque para no afectar el normal funcionamiento del sistema de tratamiento. La estación de bombeo está dotada con una botonera para arranque/parada manual que deberá ser accionada por el operador del área o el chofer del cisterna.

El agua clarificada es reusada en el riego de vías no pavimentadas de canteras, este aprovechamiento reduce la necesidad de utilización de agua fresca en dicho riego. Con respecto a la calidad requerida del agua para realizar esta actividad, se hace referencia al cumplimiento de los límites y/o rangos establecidos en la Gaceta Oficial N° 5.021 de fecha 18 de diciembre de 1995, según Decreto N° 883, artículo 10, para descarga directa o indirecta de vertidos líquidos a ríos, estuarios, lagos y embalses.

Cabe destacar que esta actividad no se realiza actualmente debido a que en la planta Pertigalete no se cuenta con camiones cisternas convencionales, razón por la cual el agua clarificada es descargada en los canales de lluvia que conducen hacia el mar.

### 3.3.1.1 Adaptación del sistema de llenado de cisternas convencionales al cisterna industrial tipo Klein 777D

Para realizar la adaptación del sistema de llenado de cisternas convencionales al cisterna industrial tipo Klein 777D, es necesario el desmontaje de un tramo de tubería existente de 6 metros con 3 codos y luego el montaje de un tramo de tubería nuevo de 13 metros con 3 codos. En la figura 3.1 se presenta el diagrama del sistema de llenado, indicando el tramo de tubería existente a desmontar y nuevo a montar.



**Figura 3.1 Diagrama del sistema de llenado, tramo de tubería existente y nuevo.**

Las propiedades físicas del fluido necesarias para los cálculos hidráulicos como lo son: temperatura de operación, densidad y viscosidad se muestran en la tabla 3.10, las características del tramo de tubería como su diámetro nominal, diámetro interno, área transversal y longitud se presentan en la tabla 3.11 para la descarga y A.7 para la succión, mientras que los accesorios mecánicos presentes en la tubería se muestran en la tabla 3.12 para la descarga y A.8 para la tubería de succión.

**Tabla 3.10 Propiedades físicas del fluido.**

Propiedad	Unidad	Valor
Temperatura de operación	[°C]	24
Densidad	[kg/m <sup>3</sup> ]	880
Viscosidad	[Pa.s]	0,001

**Tabla 3.11 Características del tramo de descarga.**

Descripción	Unidad	Valor
Diámetro nominal	[pulg]	3
Diámetro interno	[m]	0,0789
Área transversal	[m <sup>2</sup> ]	0,005
Longitud	[m]	15,88

**Tabla 3.12 Accesorios mecánicos presentes en la tubería de descarga.**

Accesorio mecánico	Cantidad
Codo estándar 90°	4
Válvula check	1
Válvula globo	1
Conexión estándar "T" flujo directo	1

Para iniciar los cálculos hidráulicos se hace necesario determinar la velocidad del fluido, usando la siguiente ecuación:

$$v = \frac{Q}{A} \quad (\text{Ec. 3.7})$$

Donde:

$v$  = velocidad del fluido [m/h].

$Q$  = caudal [m<sup>3</sup>/h].

$A$  = área de la tubería [m<sup>2</sup>].

Considerando un caudal de 20 m<sup>3</sup>/h con valor del área de tubería de descarga tomada de la tabla 3.11 y sustituyendo en la ecuación 3.7, se tiene:

$$v = \frac{20 \text{ m}^3/\text{h}}{0,005 \text{ m}^2}$$

$$v = 4.000 \frac{\text{m}}{\text{h}} = 1,1111 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Tomando como dato el valor calculado de velocidad y los valores diámetro, densidad y viscosidad de las tablas 3.10 y 3.11, sustituyendo en la ecuación 2.1, se tiene que:

$$\text{Re} = \frac{0,0789 \text{ m} \times 1,1111 \text{ m/s} \times 880 \text{ kg/m}^3}{0,001 \text{ Pa}\cdot\text{s}}$$

$$\text{Re} = 77.156,4444$$

Con el número de Reynolds obtenido, el diámetro interno de la tubería y la rugosidad de la tubería asumida para tuberías nuevas ( $\epsilon = 0,002$  mm) del diagrama de Moody, se sustituye en la ecuación 2.4 y se obtiene:

$$f = 4 \times \left[ -3,6 \times \log \left[ \left( \frac{6,9}{77.156,4444} \right) + \left( \frac{2 \times 10^{-6} \text{ m} / 0,0789 \text{ m}}{3,7} \right)^{1,11} \right] \right]^{-2}$$

$$f = 0,020$$

Para el cálculo de las pérdidas por longitud de tubería se tomaron como datos los valores de longitud y diámetro de la tabla 3.11, los valores obtenidos de velocidad y factor de fricción y se sustituyo en la ecuación 2.6, teniendo que:

$$h_L = 0,020 \times \frac{15,88 \text{ m}}{0,0789 \text{ m}} \times \frac{(1,1111 \text{ m/s})^2}{2 \times 9,8 \text{ m/s}^2}$$

$$h_L = 0,252 \text{ m}$$

Tomando las relaciones para obtener K de la tabla 2.1, la cantidad de accesorios y el factor de fricción, se tiene:

$$\text{Codo } 90^\circ: K = 4 \times 30 \times f = 4 \times 30 \times 0,0198805 = 2,3857$$

$$\text{T directa: } K = 1 \times 20 \times f = 1 \times 20 \times 0,0198805 = 0,3976$$

$$\text{Válvula check: } K = 1 \times 50 \times f = 1 \times 50 \times 0,0198805 = 0,9940$$

$$\text{Válvula globo: } K = 1 \times 340 \times f = 1 \times 340 \times 0,0198805 = 6,7594$$

$$\text{Teniendo un K total de: } K_t = 10,5367$$



Sustituyendo los valores obtenidos de velocidad y K total en la ecuación 2.7, se tiene:

$$h_A = 10,5367 \times \frac{(1,1111 \text{ m/s})^2}{2 \times 9,8 \text{ m/s}^2}$$

$$h_A = 0,6637 \text{ m}$$

Para obtener las pérdidas totales del tramo de descarga se sustituye los valores obtenidos de pérdida por longitud y por accesorios en la ecuación 2.5, se tiene:

$$h_f = 0,252 \text{ m} + 0,6637 \text{ m}$$

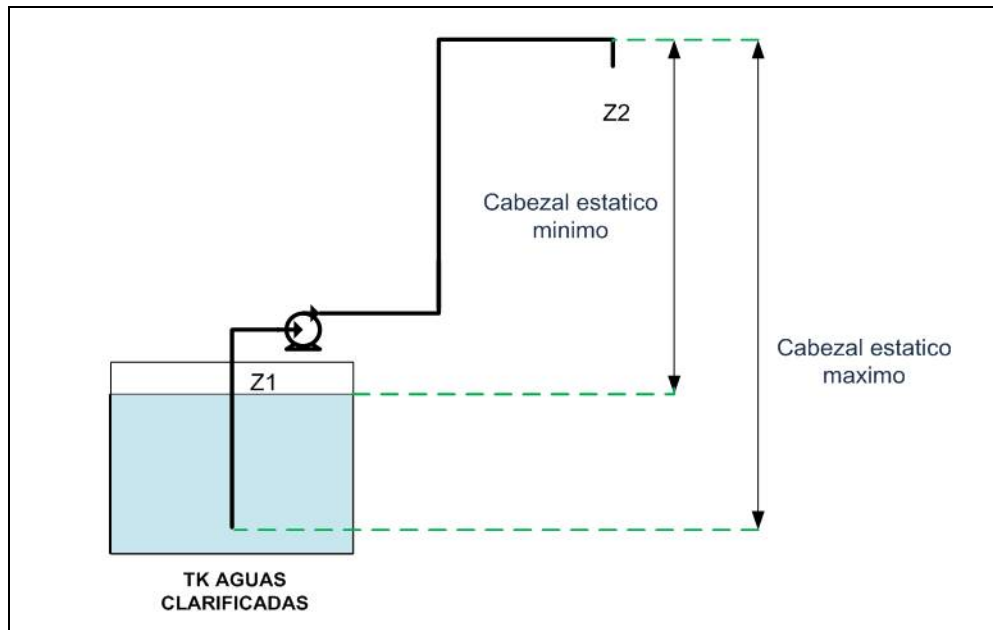
$$h_f = 0,9157 \text{ m}$$

De igual forma se realizaron los cálculos para las pérdidas totales en el tramo de succión de la bomba, dando para el caudal estudiado un valor de:  $h_f = 0,0755 \text{ m}$ ; se tiene que:

$$H_{f\text{total}} = 0,9157 \text{ m} + 0,0755 \text{ m}$$

$$H_{f\text{total}} = 0,9912 \text{ m}$$

En la figura 3.2 se muestra el tanque de aguas clarificadas, el tramo de tubería de succión y de descarga, señalándose los puntos Z1 y Z2 los cuales representan la superficie del fluido y la salida de la tubería de descarga respectivamente así como también el cabezal estático mínimo y máximo.



**Figura 3.2 Tanque aguas clarificadas, tramos de tuberías de succión y descarga.**

A continuación se describirán las condiciones de posición, presión y velocidad en el punto Z1 y Z2:

Descripción del punto Z1:

- Superficie del fluido dentro del tanque de aguas clarificadas.
- Presión 1:  $P_1 = 101,325 \text{ kPa}$
- Velocidad 1:  $v_1 = 0 \text{ m/s}$

Descripción del punto Z2:

- A la salida de la tubería de descarga.
- Presión 2:  $P_2 = 101,325 \text{ kPa}$
- Velocidad 2:  $v_2 = \text{depende del caudal m/s}$

Por último se sustituye en la ecuación 2.8 de Bernoulli para cabezal estático mínimo y máximo los valores obtenidos de velocidad y de altura de cada punto así como las pérdidas totales del sistema, teniendo que:

Para cabezal estático mínimo:

$$H_{\text{sistmin}} = (7,39 \text{ m} - (-0,65 \text{ m})) + \frac{(1,1111 \text{ m/s})^2}{2 \times 9,8 \text{ m/s}^2} + 0,9912 \text{ m}$$

$$H_{\text{sistmin}} = 9,0545 \text{ m}$$

Para cabezal estático máximo:

$$H_{\text{sistmax}} = (7,39 \text{ m} - (-3,65 \text{ m})) + \frac{(1,1111 \text{ m/s})^2}{2 \times 9,8 \text{ m/s}^2} + 0,9912 \text{ m}$$

$$H_{\text{sistmax}} = 12,0545 \text{ m}$$

Todos estos cálculos se realizaron para diversos caudales, con el fin de graficar los valores obtenidos con los cabezales de diseño de la bomba, estos resultados se muestran en las tablas B.5, B.6 y B.7 para el tramo de tubería de descarga, de succión y el cabezal total del sistema respectivamente.

### 3.3.2 Método de disposición actual de lodo

Una vez al mes se realiza el mantenimiento del sistema de tratamiento de aguas aceitosas (API) específicamente a la unidad desarenadora y al separador API con un camión de vacío, dado que las unidades anteriormente mencionadas cuentan con un solo canal se hace necesario la parada del sistema. Días previos al mantenimiento, personal del área de Equipo Pesado

con el uso de una pala mecánica crea una zanja de aproximadamente 3 m<sup>3</sup> de capacidad constituida de esquistos del suelo y ubicada en el patio de esquistos San José.

Los operadores del camión de vacío succionan todo el material contenido en el desarenador y el separador API, es decir, agua con aceite y lodo, para luego depositarlo en la zanja. Debido a que la zanja no está impermeabilizada ni cuenta con un drenaje de recolección del agua con aceite, se genera una contaminación a los suelos y plantas cercanas por lixiviación, además el lodo presenta una capa de hidrocarburos ya que el camión de vacío succiona parte de la capa de hidrocarburo que se forma en el separador API.

En la figura 3.3 se muestra una zanja usada para el secado de lodos en el patio de esquistos San José. Cabe destacar que la localización de la zanja no es un lugar fijo por lo que se crean focos de contaminación en diferentes partes del patio de esquistos San José y sus alrededores.



**Figura 3.3 Zanja usada para el secado de lodos.**

Al transcurrir aproximadamente un mes, el lodo seco es mezclado con el esquisto del patio de esquisto San José para luego ser introducidos como parte de la materia prima al proceso de producción de cemento.

### 3.3.2.1 Lecho de secado

Para el cálculo del área superficial del lecho de secado se utilizó la ecuación 2.9, tomando como dato  $3 \text{ m}^3$  de lodo a secar (valor de la capacidad de las zanjas donde se depositan actualmente y también determinado por Hidrolab Toro en su informe), además se fijará la profundidad de aplicación del lodo en  $0,20 \text{ m}$ , se tiene que:

$$A_{LS} = \frac{3 \text{ m}^3}{0,20 \text{ m}}$$

$$A_{LS} = 15 \text{ m}^2$$

En el cálculo del volumen de capa de arena necesaria para la camada del lecho de secado se utilizó la ecuación 2.10, tomando como dato el valor de área superficial calculado anteriormente y fijando una camada con profundidad de  $0,20 \text{ m}$ , se tiene que:

$$V_C = 1 \times 0,20 \text{ m} \times 15 \text{ m}^2$$

$$V_C = 3 \text{ m}^3$$

Mientras que en el cálculo del volumen de capa de grava necesaria para la camada del lecho de secado se utilizó la ecuación 2.10, tomando como dato el valor de área superficial calculada anteriormente y fijando una camada con profundidad de  $0,30 \text{ m}$ , se tiene que:

$$V_c = 1 \times 0,30 \text{ m} \times 15 \text{ m}^2$$

$$V_c = 4,5 \text{ m}^3$$

Debido a que la longitud de la tubería a usar para el sistema de drenaje guarda relación con el largo del lecho, se asume para un área superficial de  $15 \text{ m}^2$  las siguientes dimensiones del lecho, 5 m de largo, 3 m de ancho y 0,90 m de profundidad, siendo la tubería requerida para el drenaje de un aproximado de 7 m de material PVC de 10 cm de diámetro, asegurando así que la tubería atravesase el largo del lecho y que el agua recolectada fluya por efecto de gravedad al canal de entrada del desarenador del sistema de tratamiento.

Dado que ambos sistemas de tratamiento de aguas aceitosas (API) generan una cantidad menor a  $3 \text{ m}^3$  de lodo mensual, los resultados obtenidos para el lecho de secado aplican para ambos sistemas por igual y se presentan en la tabla B.8.

### **3.4 ESTIMACIÓN DE LOS COSTOS DE LA PROPUESTA DE MEJORA A LOS MÉTODOS UTILIZADOS PARA LA DISPOSICIÓN DE LOS EFLUENTES**

#### **3.4.1 Método de disposición actual de las aguas clarificadas**

##### **3.4.1.1 Estimado de costo de la adaptación del sistema de llenado de cisternas convencionales al cisterna industrial tipo Klein 777D**

Para obtener un estimado de costo de la adaptación del sistema de llenado, se requirió calcular el costo de los materiales mecánicos y de las partidas mecánicas, siendo estas:

Materiales mecánicos:

- 13 metros de tubería de acero al carbono A-53 GRB cedula 40 de 3 pulg de diámetro, debido que esta tubería se comercializa en tramos de 6 m se hace necesario adquirir tres tramos dando un total de 18 m de dicha tubería.
- 3 codos soldables de acero al carbono A-234 cedula 40 de 3 pulg de diámetro.

Partidas mecánicas:

- Desmontaje de 6 m de tubería existente.
- Fabricación y montaje de 13 m de tubería.
- Preparación de superficie (fondo, intermedia y acabado final) de 13 m de tubería con un diámetro externo de 0,09 m (3,5 pulg).

En las tablas 3.13 y 3.14 se muestran las características de costos que presentan los materiales mecánicos y las partidas mecánicas respectivamente, características basadas en datos previos sobre proyectos similares y facilitadas por el departamento de Vicepresidencia Técnica de Planta Pertigalete.

El costo de la adaptación del sistema de llenado se estimó a partir de la siguiente ecuación:

$$C_{TA} = C_{MM} + C_{PM} \quad (\text{Ec. 3.8})$$

Donde:

$C_{TA}$  = costo total de adaptación [Bs].

$C_{MM}$  = costo de materiales mecánicos [Bs].

$C_{PM}$  = costo de partidas mecánicas [Bs].

**Tabla 3.13 Características de costo de los materiales mecánicos  
(Vicepresidencia Técnica Planta Pertigalete, 2010).**

Materiales mecánicos	Cantidad comercializada	Precio [Bs]	Peso [kg/m]
Tubería AC A-53 GRB cedula 40 de 3 pulg Ø	Tramo de 6 metros	2.400	12
Codo soldable AC A-234 cedula 40 de 3 pulg Ø	Unidad	150	-

**Tabla 3.14 Características de costo de las partidas mecánicas  
(Vicepresidencia Técnica Planta Pertigalete, 2010).**

Partidas mecánicas	Personal (hombres)	Horas hombre [h]	Costo horas h. [Bs/h]	Precio desmon. [Bs/kg]	Precio prepa. super. [Bs/m <sup>2</sup> ]
Desmontaje	-	-	-	20	-
Fabricación y montaje	5	12	70	-	-
Preparación de superficie	-	-	-	-	250

El costo de materiales mecánicos comprende la procura de tubería y de codos, y se calculó con la siguiente ecuación:

$$C_{MM} = P_T + P_C \quad (\text{Ec. 3.9})$$

Donde:

$C_{MM}$  = costo de materiales mecánicos [Bs].

$P_T$  = procura de tubería [Bs].

$P_C$  = procura de codos [Bs].

La procura de tubería se calculó con el número de secciones de 6 m y el precio por sección, utilizando la siguiente ecuación:

$$P_T = N_s \times P_s \quad (\text{Ec. 3.10})$$



Donde:

$P_T$  = procura de tubería [Bs].

$N_S$  = número de secciones de 6 m.

$P_S$  = precio de sección de tubería [Bs].

La procura de los codos se calculó con el número de codos y el precio por unidad de codo, utilizando la siguiente ecuación:

$$P_C = N_C \times P_{UC} \quad (\text{Ec. 3.11})$$

Donde:

$P_C$  = procura de codos [Bs].

$N_C$  = número de codos.

$P_{UC}$  = precio por unidad de codo [Bs].

Sustituyendo el valor de precio de sección de tubería de la tabla 3.13 en la ecuación 3.10 y la respectiva cantidad requerida de sección de tubería, se tiene:

$$P_T = 3 \times 2.400 \text{ Bs}$$

$$P_T = 7.200 \text{ Bs}$$

Tomando el valor de precio unitario del codo de la tabla 3.13 y sustituyendo en la ecuación 3.11 con la respectiva cantidad requerida de codos, se tiene:

$$P_C = 3 \times 150 \text{ Bs}$$

$$P_C = 450 \text{ Bs}$$

Luego se sustituyen los valores obtenidos de  $P_T$  y  $P_C$  en la ecuación 3.9 de costo de materiales mecánicos, se tiene:

$$C_{MM} = 7.200 \text{ Bs} + 450 \text{ Bs}$$

$$C_{MM} = 7.650 \text{ Bs}$$

Con respecto al cálculo del costo de partidas mecánicas, la cual comprende los costos de desmontaje, de fabricación con montaje y de preparación de superficie, se realizó con la siguiente ecuación:

$$C_{PM} = C_D + C_{FM} + C_{PS} \quad (\text{Ec. 3.12})$$

Donde:

$C_{PM}$  = costo de partidas mecánicas [Bs].

$C_D$  = costo de desmontaje [Bs].

$C_{FM}$  = costo de fabricación y montaje [Bs].

$C_{PS}$  = costo de preparación de superficie [Bs].

El costo de desmontaje se calculo con la longitud de la tubería actual, el peso de la tubería y el precio de desmontaje, utilizando la ecuación:

$$C_D = L_{TA} \times P_{TA} \times P_D \quad (\text{Ec. 3.13})$$

Donde:

$C_D$  = costo de desmontaje [Bs].

$L_{TA}$  = longitud de la tubería actual [m].

$P_{TA}$  = peso de tubería por metro lineal [kg/m].

$P_D$  = precio de desmontaje por kg de tubería [Bs/kg].

Para el cálculo de costo de fabricación y montaje se requirió de el número de personal y la cantidad horas hombre necesarias para dicha actividad además del costo de las horas hombre y se utilizó la siguiente ecuación:

$$C_{FM} = N_P \times HH \times C_{HH} \quad (\text{Ec. 3.14})$$

Donde:

$C_{FM}$  = costo de fabricación y montaje [Bs].

$N_P$  = número de personal.

$HH$  = horas hombre [h].

$C_{HH}$  = costo horas hombre [Bs/h].

El costo de preparación de superficie se calculo con el precio de preparación de superficie, el diámetro externo de la tubería y su longitud, utilizando la siguiente ecuación:

$$C_{PS} = P_{PS} \times \pi \times D_E \times L \quad (\text{Ec. 3.15})$$

Donde:

$C_{PS}$  = costo de preparación de superficie [Bs].

$P_{PS}$  = precio de preparación de superficie por área [Bs/m<sup>2</sup>].

$\pi$  = pi (3,14).

$D_E$  = diámetro externo de la tubería [m].

L = longitud de la tubería [m].

Sustituyendo los valores de peso de la tubería y precio de desmontaje de la tabla 3.14 en la ecuación 3.13 y la longitud de la tubería a desmontar, se tiene:

$$C_D = 6 \text{ m} \times 12 \frac{\text{kg}}{\text{m}} \times 20 \frac{\text{Bs}}{\text{kg}}$$

$$C_D = 1.440 \text{ Bs}$$

Se sustituyeron los valores de número de personal, horas hombre y costo de horas hombre de la tabla 3.14 en la ecuación 3.14 como a continuación:

$$C_{FM} = 5 \times 12 \text{ h} \times 70 \frac{\text{Bs}}{\text{h}}$$

$$C_{FM} = 4.200 \text{ Bs}$$

Sustituyendo el valor de precio de preparación de superficie de la tabla 3.14 y la longitud de la tubería con su diámetro externo en la ecuación 3.15, se tiene:

$$C_{PS} = 250 \frac{\text{Bs}}{\text{m}^2} \times 3,14 \times 0,09 \text{ m} \times 13 \text{ m}$$

$$C_{PS} = 918,45 \text{ Bs}$$

Luego se sustituyen los valores obtenidos de  $C_D$ ,  $C_{FM}$  y  $C_{PS}$  en la ecuación 3.12 de costo de partidas mecánicas, se tiene:

$$C_{PM} = 1.440 \text{ Bs} + 4.200 \text{ Bs} + 918,45 \text{ Bs}$$

$$C_{PM} = 6.558,45 \text{ Bs}$$

Por último se sustituye los valores obtenidos de  $C_{MM}$  y  $C_{PM}$  en la ecuación 3.8 de costo total de adaptación, teniendo que:

$$C_{TA} = 7.650 \text{ Bs} + 6.558,45 \text{ Bs}$$

$$C_{TA} = 14.208,45 \text{ Bs}$$

Dado que ambos sistemas de tratamiento de aguas aceitosas (API) requieren una idéntica adaptación del sistema de llenado, el resultado obtenido del estimado de costo aplica para los dos sistemas por igual y se presenta en la tabla 4.8.

### **3.4.2 Método de disposición actual de lodo**

#### **3.4.2.1 Estimado de costo del lecho de secado**

Para obtener un estimado de costo de la construcción e incorporación de un lecho de secado de lodo al sistema de tratamiento, se calculó el costo de las partidas civiles y sus respectivos materiales en función de los precios unitarios.

En la tabla 3.15 se muestra el precio unitario de las partidas civiles y sus respectivos materiales, precios unitarios basados en datos previos sobre

proyectos similares y facilitados por el departamento de Vicepresidencia Técnica de Planta Pertigalete.

**Tabla 3.15 Precio unitario de las partidas civiles y sus respectivos materiales (Vicepresidencia Técnica Planta Pertigalete, 2010).**

Partidas civiles y sus materiales	Unidad (PU)	Precio unitario
Arena fina	Bs/m <sup>3</sup>	330,00
Piedra picada	Bs/m <sup>3</sup>	380,00
Concreto (con encofrado)	Bs/m <sup>3</sup>	1.290,00
Acero de refuerzo	Bs/kg	16,00
Friso de revestimiento	Bs/m <sup>2</sup>	134,79

El costo de la construcción e instalación de un lecho de secado al sistema de tratamiento se estimó a partir de la siguiente ecuación:

$$C_{TLS} = C_{CA} + C_{CG} + C_{CE} + C_{AR} + C_{FR} \quad (\text{Ec. 3.16})$$

Donde:

$C_{TLS}$  = costo total del lecho de secado [Bs].

$C_{CA}$  = costo de la camada de arena [Bs].

$C_{CG}$  = costo de la camada de grava [Bs].

$C_{CE}$  = costo del concreto con encofrado [Bs].

$C_{AR}$  = costo del acero de refuerzo [Bs].

$C_{FR}$  = costo del friso de revestimiento [Bs].

El costo de la camada de arena se calculó con el volumen de la camada y el precio unitario de arena fina, utilizando la siguiente ecuación:

$$C_{CA} = V_C \times PU_{AF} \quad (\text{Ec. 3.17})$$

Donde:

$C_{CA}$  = costo de la camada de arena [Bs].

$V_C$  = volumen de la camada [ $m^3$ ].

$PU_{AF}$  = precio unitario de arena fina [ $Bs/m^3$ ].

Sustituyendo el valor de volumen de la camada de la tabla B.8 y el precio unitario de arena fina de la tabla 3.15 en la ecuación 3.17, se tiene:

$$C_{CA} = 3 \text{ m}^3 \times 330 \frac{\text{Bs}}{\text{m}^3}$$

$$C_{CA} = 990 \text{ Bs}$$

El costo de la camada de grava se calculó con el volumen de la camada y el precio unitario de piedra picada, utilizando la siguiente ecuación:

$$C_{CG} = V_C \times PU_{PP} \quad (\text{Ec. 3.18})$$

Donde:

$C_{GA}$  = costo de la camada de grava [Bs].

$V_C$  = volumen de la camada [ $m^3$ ].

$PU_{PP}$  = precio unitario de piedra picada [ $Bs/m^3$ ].

Sustituyendo el valor de volumen de la camada de la tabla B.8 y el precio unitario de piedra picada de la tabla 3.15 en la ecuación 3.18, se tiene:

$$C_{CG} = 4,5 \text{ m}^3 \times 380 \frac{\text{Bs}}{\text{m}^3}$$

$$C_{CC} = 1.710 \text{ Bs}$$

El costo del concreto con encofrado comprende el computo métrico de concreto y el precio unitario del concreto con encofrado, y se calculó utilizando la siguiente ecuación:

$$C_{CE} = CM_C \times PU_{CE} \quad (\text{Ec. 3.19})$$

Donde:

$C_{CE}$  = costo del concreto con encofrado [Bs].

$CM_C$  = computo métrico de concreto [ $m^3$ ].

$PU_{CE}$  = precio unitario del concreto con encofrado [ $Bs/m^3$ ].

El computo métrico de concreto se calculó con el número de paredes, el largo, el ancho, profundidad y el área del lecho de secado así como también el espesor de las paredes (0,15 m) y del fondo (0,20 m) según Norma Covenin, Edificaciones II (2000–89); utilizando la siguiente ecuación:

$$CM_C = [N_p(L \times P \times E)] + [N_p(A \times P \times E)] + [N_p(A_{LS} \times E)] \quad (\text{Ec. 3.20})$$

Donde:

$CM_C$  = computo métrico de concreto [ $m^3$ ].

$N_p$  = número de paredes.

$L$  = largo del lecho [m].

$A$  = ancho del lecho [m].

$P$  = profundidad del lecho [m].

$E$  = espesor de pared [m].

$A_{LS}$  = área del lecho de secado [ $m^2$ ].



Sustituyendo el valor de número de paredes, el largo (5 m), el ancho (3 m), profundidad (0,90 m) y el área del lecho de secado de la tabla B.8 así como también el espesor de las paredes (0,15 m) y del fondo (0,20 m) en la ecuación 3.20, se tiene:

$$CM_C = [2(5 \times 0,90 \times 0,15) m^3] + [2(3 \times 0,90 \times 0,15) m^3] + [1(15 \times 0,20) m^3]$$

$$CM_C = 5,16 m^3$$

Luego se sustituye el valor obtenido de  $CM_C$  y el precio unitario del concreto con encofrado de la tabla 3.15 en la ecuación 3.19, se tiene:

$$C_{CE} = 5,16 m^3 \times 1.290 \frac{Bs}{m^3}$$

$$C_{CE} = 6.656,40 Bs$$

El costo del acero de refuerzo comprende el computo métrico de acero de refuerzo y el precio unitario del acero de refuerzo, y se calculó utilizando la siguiente ecuación:

$$C_{AR} = CM_{AR} \times P_{AR} \times PU_{AR} \quad (\text{Ec. 3.21})$$

Donde:

$C_{AR}$  = costo del acero de refuerzo [Bs].

$CM_{AR}$  = computo métrico de acero de refuerzo [ $m^2$ ].

$P_{AR}$  = peso del acero de refuerzo por metro cuadrado [ $kg/m^2$ ].

$PU_{AR}$  = precio unitario del acero de refuerzo [Bs/kg].

El computo métrico de acero de refuerzo se calculó con el número de paredes, el largo, el ancho y profundidad así como también el espacio libre requerido en los extremos de las paredes (0,10 m) según Norma Covenin, Edificaciones II (2000–89); utilizando la siguiente ecuación:

$$CM_{AR} = [N_P(L_{ELR} \times P_{ELR})] + [N_P(A_{ELR} \times P_{ELR})] + [N_P(L_{ELR} \times A_{ELR})] \quad (\text{Ec. 3.22})$$

Donde:

$CM_{AR}$  = computo métrico de acero de refuerzo [ $m^2$ ].

$N_P$  = número de paredes.

$L_{ELR}$  = largo del lecho menos el espacio libre requerido [m].

$A_{ELR}$  = ancho del lecho menos el espacio libre requerido [m].

$P_{ELR}$  = profundidad del lecho menos el espacio libre requerido [m].

Sustituyendo el valor de número de paredes, el largo (5 m), el ancho (3 m) y profundidad (0,90 m) así como también el espacio libre requerido en los extremos de las paredes (0,10 m) en la ecuación 3.22, se tiene:

$$CM_{AR} = [2(4,90 \times 0,80) m^2] + [2(2,90 \times 0,80) m^2] + [1(4,90 \times 2,90) m^2]$$

$$CM_{AR} = 26,69 m^2$$

Luego se sustituye el valor obtenido de  $CM_{AR}$ , el precio unitario del acero de refuerzo de la tabla 3.15 y el peso del acero de refuerzo por metro cuadrado en la ecuación 3.21, se tiene:

$$C_{AR} = 26,69 m^2 \times 1,98 \frac{kg}{m^2} \times 16 \frac{Bs}{kg}$$

$$C_{AR} = 845,60 \text{ Bs}$$

El costo del friso de revestimiento se calculó con el área del lecho de secado y el precio unitario de friso de revestimiento, utilizando la siguiente ecuación:

$$C_{FR} = A_{LS} \times PU_{FR} \quad (\text{Ec. 3.23})$$

Donde:

$C_{FR}$  = costo del friso de revestimiento [Bs].

$A_{LS}$  = área del lecho de secado [ $\text{m}^2$ ].

$PU_{FR}$  = precio unitario de friso de revestimiento [ $\text{Bs}/\text{m}^2$ ].

Sustituyendo el valor de área del lecho de secado de la tabla B.8 y el precio unitario de friso de revestimiento de la tabla 3.15 en la ecuación 3.23, se tiene:

$$C_{FR} = 15 \text{ m}^2 \times 134,79 \frac{\text{Bs}}{\text{m}^2}$$

$$C_{FR} = 2.021,85 \text{ Bs}$$

Por último se sustituye los valores obtenidos de  $C_{CA}$ ,  $C_{CG}$ ,  $C_{CE}$ ,  $C_{AR}$  y  $C_{FR}$  en la ecuación 3.16 de costo total del lecho de secado, teniendo que:

$$C_{TLS} = 990 \text{ Bs} + 1.710 \text{ Bs} + 6.656,40 \text{ Bs} + 845,60 \text{ Bs} + 2.021,85 \text{ Bs}$$

$$C_{TLS} = 12.223,85 \text{ Bs}$$

Dado que ambos sistemas de tratamiento de aguas aceitosas (API) generan una cantidad similar de lodos aceitosos, el resultado obtenido del estimado de costo aplica para los dos sistemas por igual y se presenta en la tabla 4.8.

## **CAPÍTULO 4**

### **DISCUSIÓN DE RESULTADOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

#### **4.1 RECOPIACIÓN DE LOS PARÁMETROS FISICOQUÍMICOS DE LOS EFLUENTES DE LOS SISTEMAS**

El conocimiento de los parámetros fisicoquímicos del afluente y las aguas clarificadas desde la puesta en marcha de los sistemas hasta la actualidad permite la determinación de la eficiencia cronológica del tratamiento, el comportamiento de los valores, su posible reutilización así como también la verificación del cumplimiento de los límites y/o rangos establecidos en la Gaceta Oficial N° 5.021 de fecha 18 de diciembre de 1995, según Decreto N° 883, artículo 10, para descarga directa o indirecta de vertidos líquidos a ríos, estuarios, lagos y embalses. Los parámetros recopilados son: T, pH, color, DBO, DQO, aceites y grasas minerales e hidrocarburos (AGMH), nitrógeno total (NT), fósforo total (FT), sulfuros, fluoruros, fenoles y coliformes totales (CT).

Además de la representación gráfica de los diferentes parámetros, se calcularon al conjunto de datos, valores promedios, rangos y las desviaciones existentes entre los valores de cada parámetro, mostrados en las tablas 4.1 y 4.2 para el sistema del área de Equipo Liviano y el sistema del área de Equipo Pesado respectivamente.

**Tabla 4.1 Promedio, desviación y rango de los parámetros  
físicoquímicos del afluente y aguas clarificadas de Equipo Liviano.**

Parámetro	Unidad	Afluente			Aguas clarificadas		
		Promedio	Desviación	Rango	Promedio	Desviación	Rango
T	[°C]	31,29	3,80	28 - 39	29,94	0,83	28 - 31
pH	[Adim.]	8,47	1,14	7,08 - 11,98	7,82	0,41	7,15 - 9,00
Color	[Unid. Pt Co]	43,24	67,80	5 - 300	27,06	23,79	5 - 100
DBO	[mg/l]	120,59	80,90	12 - 307	31,18	14,02	4,00 - 48,00
DQO	[mg/l]	366,82	221,33	66 - 854	106,82	28,58	65 - 161
AGMH	[mg/l]	16,06	20,42	1,00 - 62,00	3,42	3,24	0,1 - 11
NT	[mg/l]	12,65	13,62	2,00 - 48,00	5,13	5,28	0,1 - 18
FT	[mg/l]	0,53	0,98	0,01 - 3,73	0,24	0,23	0,01 - 0,72
Sulfuros	[mg/l]	1,73	2,05	0,01 - 6,00	0,59	0,77	0,01 - 2,5
Fluoruros	[mg/l]	1,32	1,48	0,01 - 5,33	0,78	0,86	0,01 - 3,46
Fenoles	[mg/l]	0,07	0,05	0,01 - 0,21	0,03	0,02	0,01 - 0,08
CT	[NMP/100ml]	1343,53	1734,91	200 - 4750	425,29	316,03	200 - 900

**Tabla 4.2 Promedio, desviación y rango de los parámetros  
físicoquímicos del afluente y aguas clarificadas de Equipo Pesado.**

Parámetro	Unidad	Afluente			Aguas clarificadas		
		Promedio	Desviación	Rango	Promedio	Desviación	Rango
T	[°C]	29,80	2,68	25 - 35	29,80	1,08	28 - 31
pH	[Adim.]	8,47	1,00	7,62 - 11,7	8,12	0,52	7,32 - 9,00
Color	[Unid. Pt Co]	115,00	190,23	5 - 750	41,33	34,15	10 - 125
DBO	[mg/l]	199,87	139,50	51 - 390	60,07	60,02	22 - 274
DQO	[mg/l]	818,40	687,43	184 - 2111	235,60	273,51	96 - 1188
AGMH	[mg/l]	67,53	80,48	5 - 215	10,00	14,77	1,00 - 60,00
NT	[mg/l]	13,34	16,69	0,1 - 52	4,75	3,79	0,1 - 12
FT	[mg/l]	1,42	2,29	0,01 - 7,55	0,74	1,08	0,01 - 4,21
Sulfuros	[mg/l]	1,69	1,70	0,01 - 5,05	0,44	0,32	0,02 - 1
Fluoruros	[mg/l]	2,22	2,90	0,01 - 7,65	1,18	1,67	0,01 - 4,55
Fenoles	[mg/l]	0,12	0,15	0,01 - 0,63	0,08	0,12	0,01 - 0,45
CT	[NMP/100ml]	840,00	1281,07	200 - 4800	340,00	289,83	200 - 900

#### **4.1.1 Parámetros fisicoquímicos del afluente y aguas clarificadas del sistema de Equipo Liviano**

En la figura 4.1 puede apreciarse el comportamiento de la temperatura en el sistema de tratamiento de Equipo Liviano, variando en un rango de 28 a 39 y de 28 a 31 °C para el afluente y efluente respectivamente, los valores de este parámetro en el efluente no están fuera de lo establecido en la normativa ambiental, no obstante un alto nivel de temperatura en el afluente favorece a la separación del crudo y el agua.

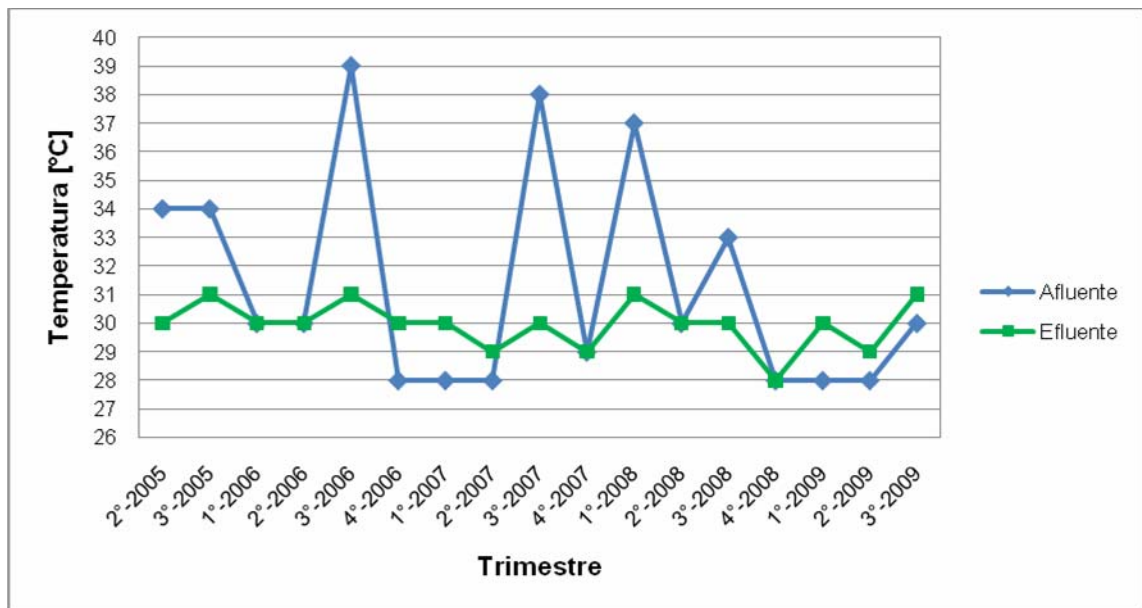
El promedio y la desviación de la temperatura en el afluente son de 31,29 y 3,80 °C, mientras que para el efluente son de 29,94 y 0,83 °C, observándose que los valores de temperatura en la corriente efluente son poco variables.

En la figura 4.2 se muestra como fue el comportamiento del pH en el sistema de tratamiento, variando dentro de un rango de 7,08 a 11,98 y de 7,15 a 9,00 unidades para el afluente y efluente respectivamente, el efluente presenta valores dentro de los límites y/o rangos establecidos en la normativa ambiental vigente, excepto en el trimestre 2°-2009 que su valor iguala al límite máximo permitido, un factor que puede promover altos niveles en el parámetro es el uso de desengrasantes y champús de carácter alcalino, por ello se recomienda el empleo de desengrasantes y champús de carácter neutro.

El promedio y desviación del pH en el afluente son de 8,47 y 1,14 unidades, mientras que para el efluente son de 7,82 y 0,41 unidades.

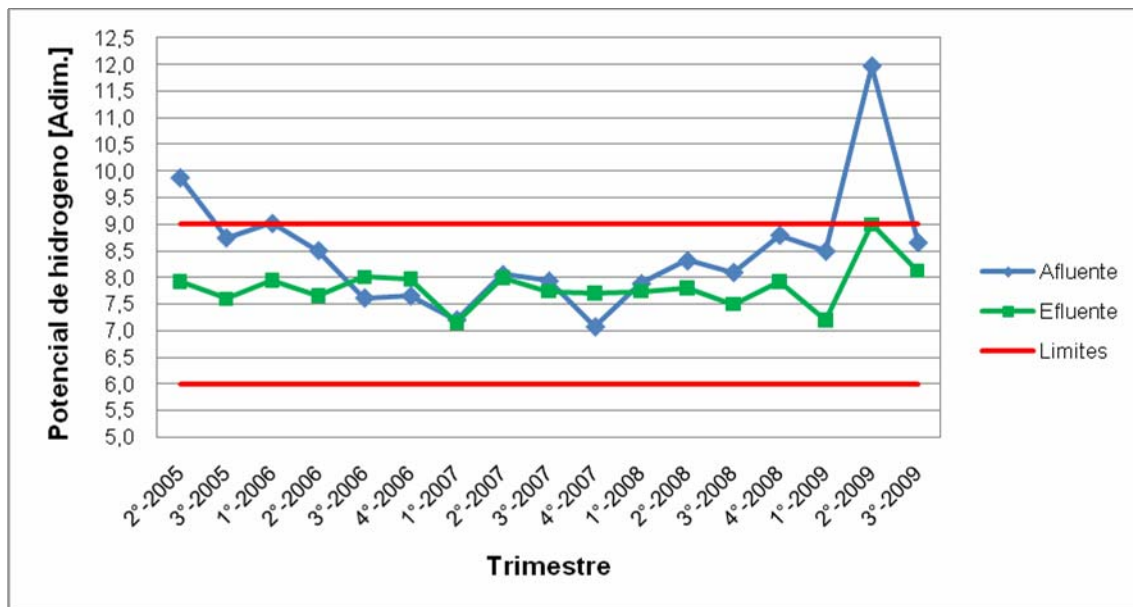
La figura 4.3 es la representación grafica del comportamiento de los aceites y grasas minerales e hidrocarburos (AGMH), donde el AGMH varía dentro de un rango de 1,00 a 62,00 y de 0,10 a 11,00 mg/l para el afluente y efluente respectivamente, el efluente presenta todos sus valores dentro de los límites y/o rangos establecidos.

Los valores de AGMH presentan un promedio y desviación de 16,06 y 20,42 mg/l para el afluente, mientras que el efluente presenta 3,42 y 3,24 mg/l de promedio y desviación respectivamente.

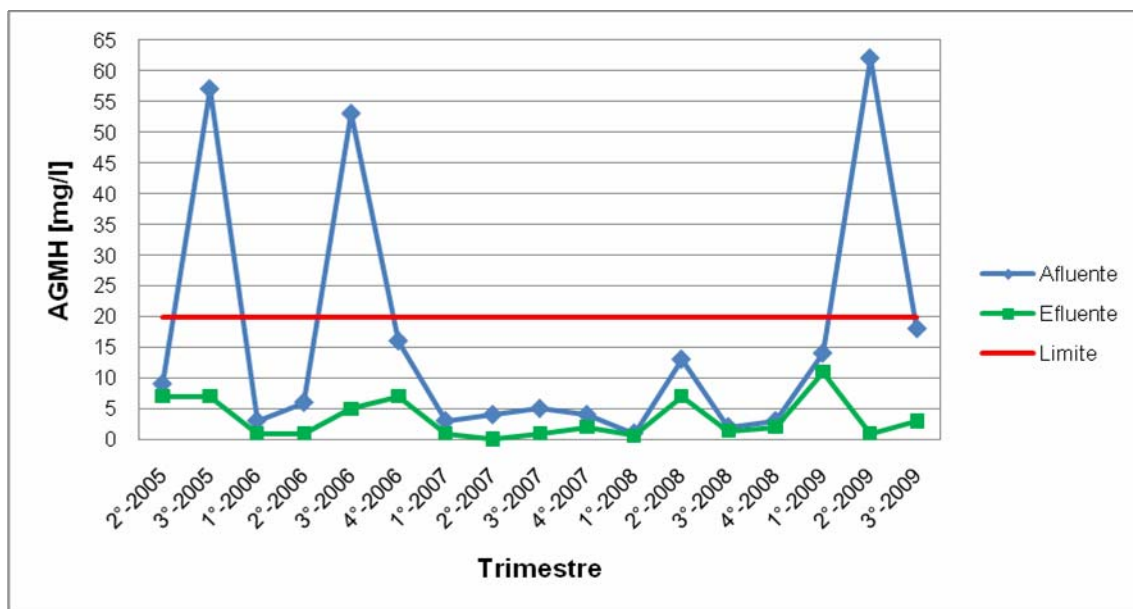


**Figura 4.1 Comportamiento de la temperatura en el afluente y efluente del sistema del área de Equipo Liviano.**





**Figura 4.2 Comportamiento del pH en el afluente y efluente del sistema del área de Equipo liviano.**

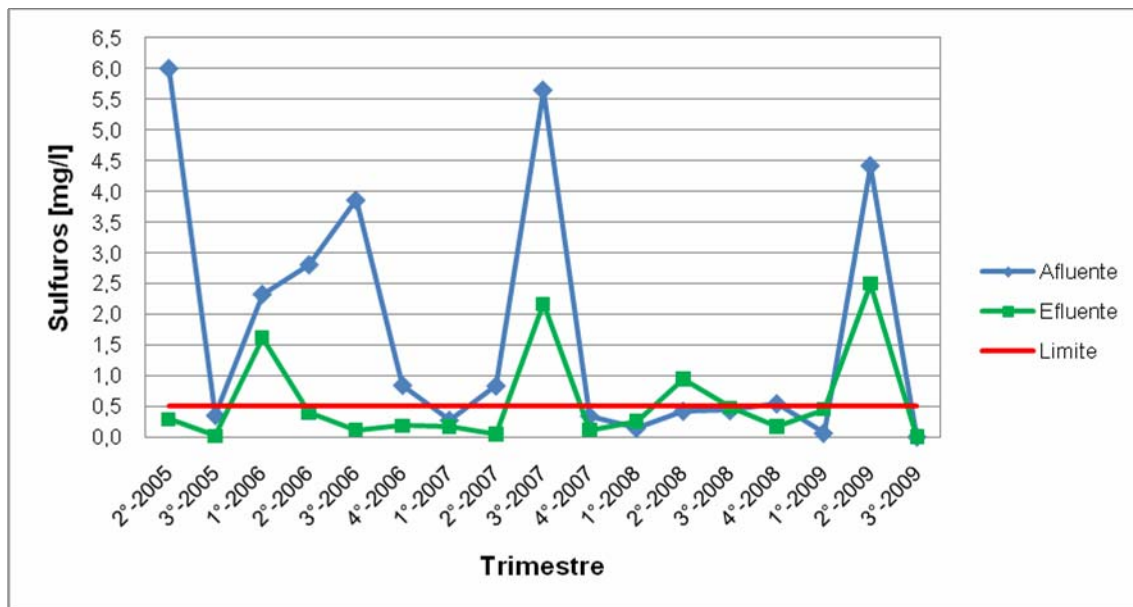


**Figura 4.3 Comportamiento de los AGMH en el afluente y efluente del sistema del área de Equipo Liviano.**

En la figura 4.4 puede apreciarse el comportamiento de los sulfuros en el sistema de tratamiento, variando en un rango de 0,01 a 6,00 y de 0,01 a 2,50 mg/l para el afluente y efluente respectivamente, el efluente presenta valores dentro de los límites y/o rangos establecidos por la normativa ambiental vigente, excepto en los trimestres 1°-2006, 3°-2007, 2°-2008 y 2°-2009 donde se presentan valores atípicos a la tendencia de los valores en general y sobrepasando en 2 mg/l el límite máximo permitido que es 0,5 mg/l, estos picos que presenta el parámetro se le pueden atribuir a que no se realiza una limpieza continua al sistema ocasionando que colapse y se cree una condición de septización donde se liberan sulfuros por acción de bacterias, por ello se recomienda efectuar un mantenimiento continuo y constante del sistema y achicar el tanque de aguas clarificadas regularmente para mantenerlas el menor tiempo posible en el tanque.

El promedio y la desviación de los sulfuros en el afluente son 1,73 y 2,05 mg/l respectivamente, mientras que para el efluente son 0,59 y 0,77 mg/l.

Con respecto al comportamiento del resto de los parámetros como lo son: color, demanda bioquímica de oxígeno, demanda química de oxígeno, nitrógeno total, fósforo total, fluoruros, fenoles y coliformes totales, todos los valores del efluente de cada uno de estos parámetros cumplen con los límites y/o rangos establecidos en la Gaceta Oficial N° 5.021 de fecha 18 de diciembre de 1995, según Decreto 883, Artículo 10, para descarga directa o indirecta de vertidos líquidos a ríos, estuarios, lagos y embalses. Las representaciones graficas de dichos parámetros se pueden apreciar en el anexo C, las figuras de la C.1 a la C.8, sus respectivos valores de promedio y rango se pueden observar en la tabla 4.1.



**Figura 4.4 Comportamiento de los sulfuros en el afluyente y efluente del sistema del área de Equipo Liviano.**

#### **4.1.2 Parámetros fisicoquímicos del afluyente y aguas clarificadas del sistema del área de Equipo Pesado**

En la figura 4.5 puede apreciarse el comportamiento de la temperatura, variando en un rango de 25 a 35 y de 28 a 31 °C para el afluyente y efluente respectivamente, los valores de este parámetro en el efluente no están fuera de lo establecido en la normativa ambiental, no obstante un alto nivel de temperatura en el afluyente favorece a la separación del crudo y el agua. El promedio y la desviación de la temperatura en el afluyente son de 29,80 y 2,68 °C, mientras que para el efluente son de 29,80 y 1,08 °C, observándose que los valores en la corriente efluente son poco variables.

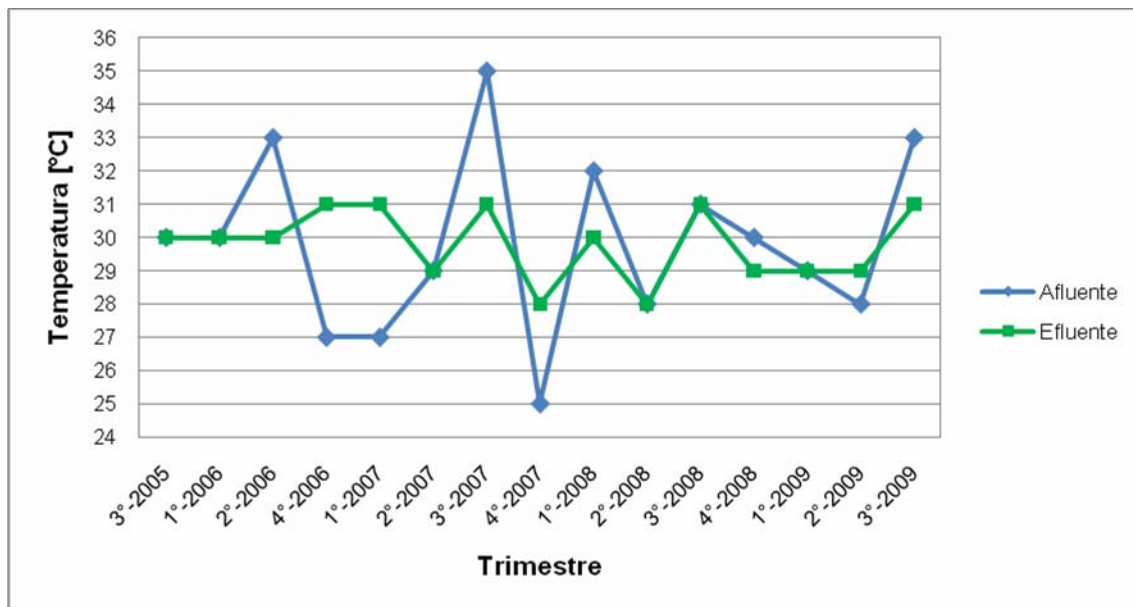
En la figura 4.6 se muestra como fue el comportamiento del pH en el sistema de tratamiento, variando dentro de un rango de 7,62 a 11,70 y de 7,32 a 9,00 unidades para el afluyente y efluente respectivamente, el efluente presenta valores dentro de los límites y/o rangos establecidos en la

normativa ambiental vigente, excepto en el trimestre 2°-2009 que su valor iguala al límite máximo permitido, un factor que puede promover altos niveles en el parámetro es el uso de desengrasantes y champús de carácter alcalino, por ello se recomienda el empleo de desengrasantes y champús de carácter neutro.

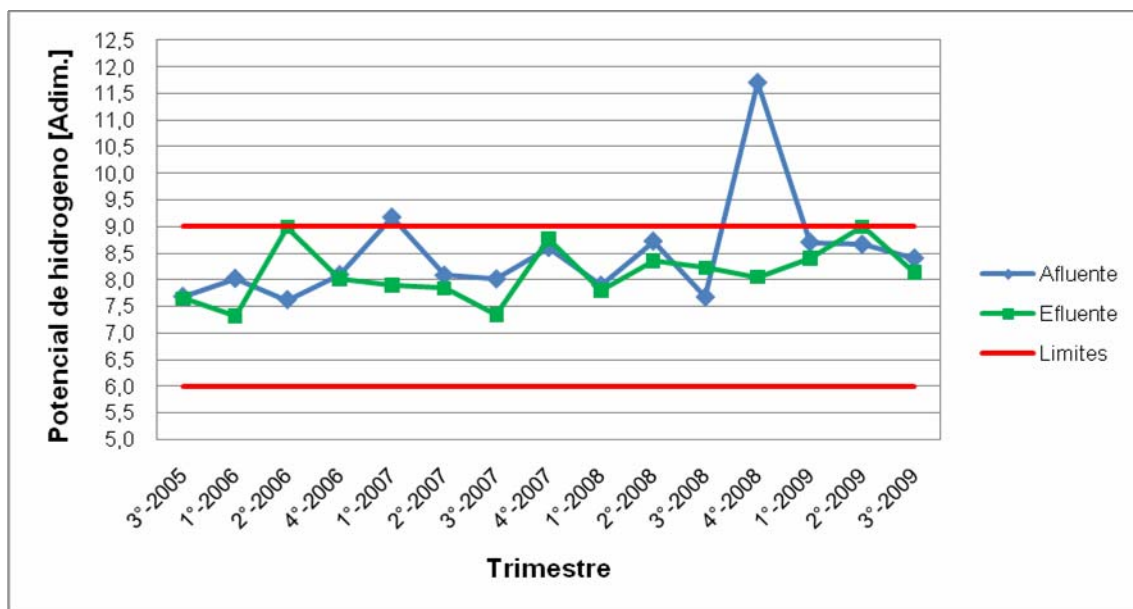
El promedio y desviación del pH en el afluente son de 8,47 y 1,00 unidades, mientras que para el efluente son de 8,12 y 0,52 unidades.

La figura 4.7 es la representación grafica del comportamiento del DBO, donde varía dentro de un rango de 51 a 442 y de 22 a 274 mg/l para el afluente y efluente respectivamente, el efluente presenta todos sus valores dentro de los límites y/o rangos establecidos en la normativa ambiental vigente, excepto en el trimestre 2°-2008 donde se presento un valor atípico a la tendencia de los valores en general y sobrepasando en 214 mg/l al límite máximo permitido que es 60 mg/l.

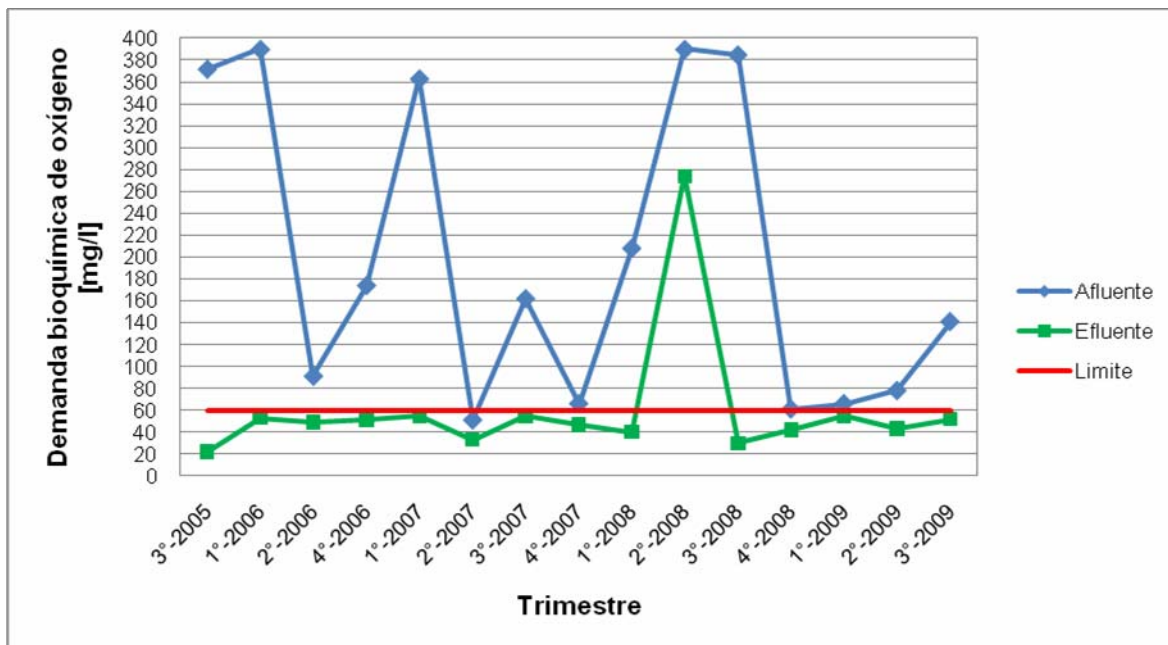
Los valores de AGMH presentan un promedio y desviación de 16,06 y 20,42 mg/l para el afluente, mientras que el efluente presenta 3,42 y 3,24 mg/l de promedio y desviación respectivamente.



**Figura 4.5 Comportamiento de la temperatura en el afluente y efluente del sistema del área de Equipo Pesado.**



**Figura 4.6 Comportamiento del pH en el afluente y efluente del sistema del área de Equipo Pesado.**



**Figura 4.7 Comportamiento del DBO en el afluente y efluente del sistema del área de Equipo Pesado.**

En la figura 4.8 se muestra como fue el comportamiento del DQO en el sistema de tratamiento, variando dentro de un rango de 184 a 2.111 y de 96 a 1.188 mg/l para el afluente y efluente respectivamente, el efluente presenta valores dentro de los límites y/o rangos establecidos en la normativa ambiental vigente, excepto en el trimestre 2°-2009 donde se presentó un valor atípico a la tendencia de los valores en general y sobrepasando en 838 mg/l al límite máximo permitido que es 350 mg/l.

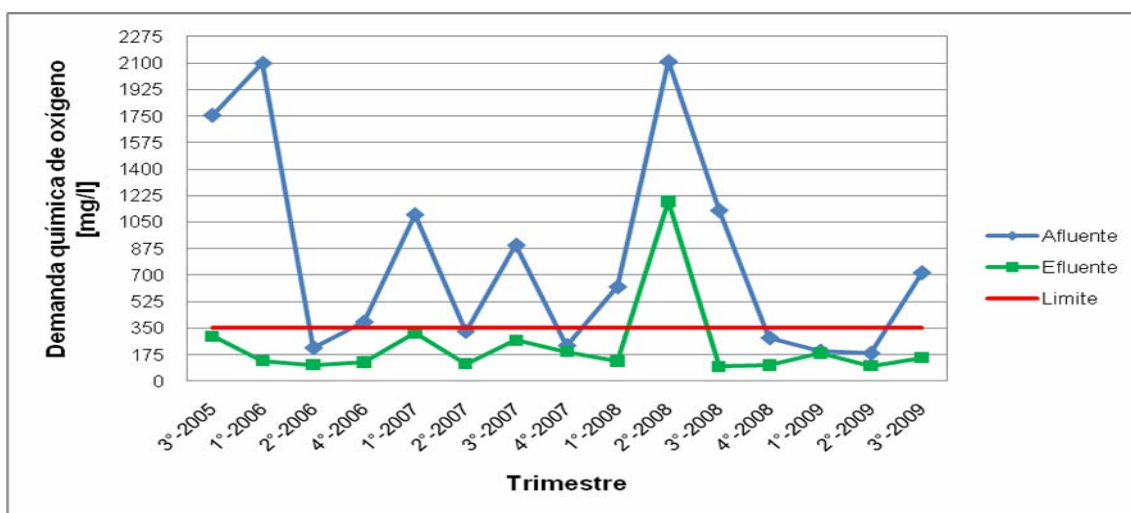
El promedio y desviación del DQO en el afluente son de 818,40 y 687,43 mg/l, mientras que para el efluente son de 235,60 y 273,51 mg/l.

En la figura 4.9 puede apreciarse el comportamiento de AGMH en el sistema de tratamiento, variando dentro de un rango de 5 a 215 y de 1 a 60 mg/l para el afluente y efluente respectivamente, el efluente presenta valores dentro de los límites y/o rangos establecidos en la normativa ambiental

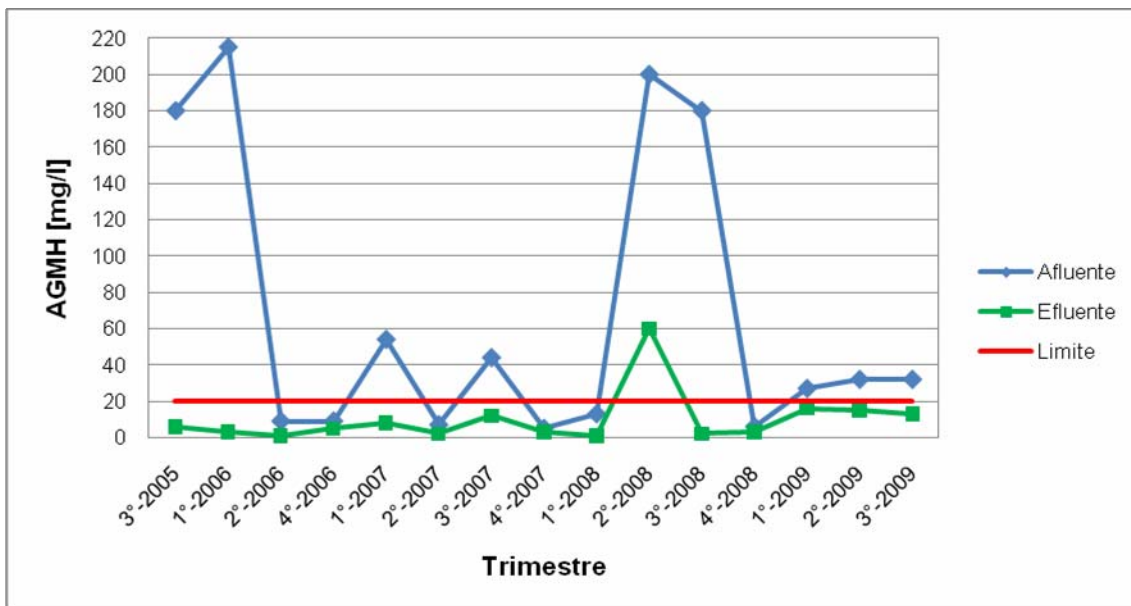
vigente, excepto en el trimestre 2°-2009 donde se presento un valor atípico a la tendencia en de los valores en general y sobrepasando en 40 mg/l al límite máximo permitido que es 20 mg/l.

Los valores de AGMH presentan un promedio y desviación de 67,53 y 80,48 mg/l para el afluente, mientras que el efluente presenta 10,00 y 14,77 mg/l de promedio y desviación respectivamente.

El valor atípico que se presento en el trimestre 2°-2009 para el parámetro AGMH, se le puede atribuir a un incidente reportado por el encargado del sistema de tratamiento de Equipo Pesado, el encargado informo que en varias tardes entre los meses de mayo y junio, personal de otras áreas descargaban recipientes con aceites e hidrocarburos sin supervisión, específicamente en el área del desnatador del separador API, extremo de la salida del separador. Área del separador donde también se encuentra la sección o cámara final que es una pantalla separadora semi-sumergida que retiene el agua antes de su paso al tanque de aguas clarificadas, lo que pudo ocasionar turbulencia y un paso adicional de crudo al tanque de aguas clarificadas.



**Figura 4.8 Comportamiento del DQO en el afluente y efluente del sistema del área de Equipo Pesado.**



**Figura 4.9 Comportamiento de AGMH en el afluente y efluente del sistema del área de Equipo Pesado.**

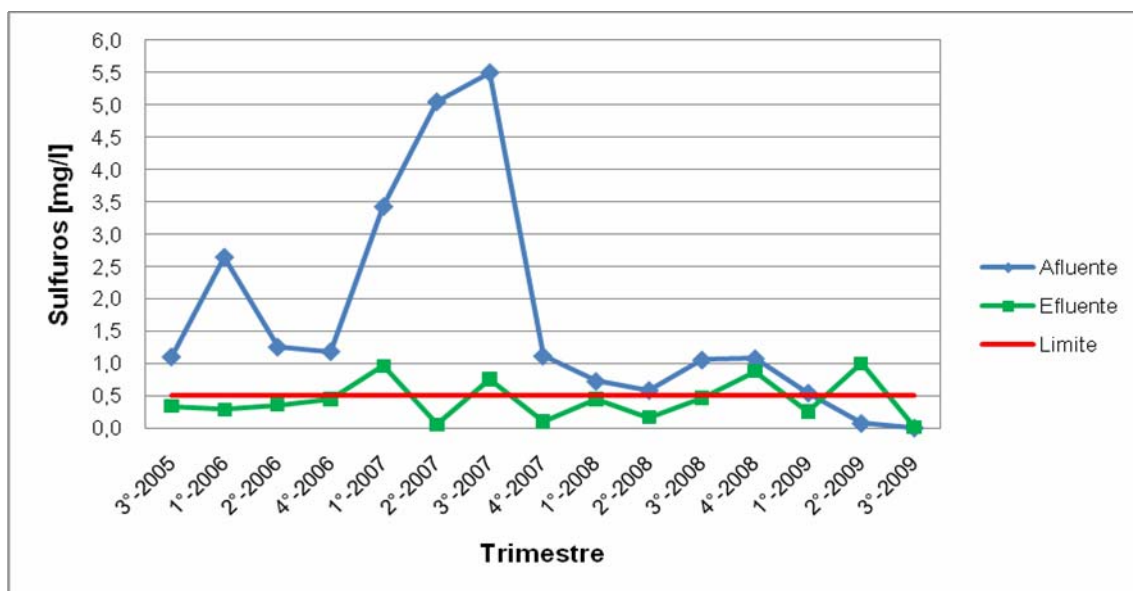
Aunque se tardó tiempo en identificar que esas descargas sin supervisión afectaban el proceso normal del sistema, se corrigió informando al personal que en el caso que los recipientes contengan una mezcla de agua-aceite se debía descargar a la entrada del sistema y en el caso que sólo sea aceites e hidrocarburos se descargarán directamente al tanque de hidrocarburos recuperados.

Otro detalle importante de destacar es que los parámetros DQO y AGMH están relacionados entre sí ya que como se sabe, el DQO mide la cantidad de contaminantes solubles e insolubles encontrados en el agua, dentro de éstos se encuentran tanto los hidrocarburos como los aceites contenidos en emulsiones finas estabilizadas, es por ello que altos valores de AGMH ocasiona altos valores del DQO.



En la figura 4.10 puede apreciarse el comportamiento de los sulfuros en el sistema de tratamiento, variando en un rango de 0,01 a 5,05 y de 0,02 a 1,00 mg/l para el afluente y efluente respectivamente, el efluente presenta valores dentro de los límites y/o rangos establecidos por la normativa ambiental vigente, excepto en los trimestres 1°-2007, 3°-2007, 4°-2008 y 2°-2009 donde se presentan valores atípicos a la tendencia de los valores en general y sobrepasando en 0,5 mg/l el límite máximo permitido que es 0,5 mg/l, estos picos que presenta el parámetro se le pueden atribuir a que no se realiza una limpieza continua al sistema ocasionando que colapse y se cree una condición de septización donde se liberan sulfuros por acción de bacterias, por ello se recomienda efectuar un mantenimiento continuo y constante del sistema y achicar el tanque de aguas clarificadas regularmente para mantenerlas el menor tiempo posible en el tanque.

El promedio y la desviación de los sulfuros en el afluente son 1,69 y 1,70 mg/l respectivamente, mientras que para el efluente son 0,44 y 0,32 mg/l.



### **Figura 4.10 Comportamiento de los sulfuros en el afluente y efluente del sistema del área de Equipo Pesado.**

Con respecto al comportamiento del resto de los parámetros como lo son: color, nitrógeno total, fósforo total, fluoruros, fenoles y coliformes totales, todos los valores del efluente de cada uno de estos parámetros cumplen con los límites y/o rangos establecidos en la Gaceta Oficial N° 5.021 de fecha 18 de diciembre de 1995, según Decreto 883, artículo 10, para descarga directa o indirecta de vertidos líquidos a ríos, estuarios, lagos y embalses. Las representaciones gráficas de dichos parámetros se pueden apreciar en el anexo C, las figuras de la C.9 a la C.14, sus respectivos valores de promedio y rango se pueden observar en la tabla 4.2.

#### **4.1.3 Características de los lodos aceitosos**

El conocimiento de las características de los lodos aceitosos es un fundamental para verificar si el manejo que se le aplica actualmente es el correcto o si es necesario someterlo a un proceso adicional para adecuarlo y cumplir con la normativa ambiental.

En el informe recopilado se evaluaron las características en concordancia con los valores reglamentados en la Gaceta Oficial N° 5.245 de fecha 03 de agosto de 1998, según Decreto N° 2.636; las características son las siguientes:

- Características de peligrosidad: corrosividad (pH), punto de inflamación, reactividad al ácido sulfhídrico ( $H_2S$ ) y reactividad al ácido cianhídrico (HCN).
- Características de metales: cadmio y sus compuestos, cobre compuestos solubles (sales y ácidos), cromo y sus compuestos, plomo y

sus compuestos (sales y óxidos), níquel y sus compuestos (sales y óxidos) y cinc y sus compuestos (polvos, sales y óxidos).

- Características en lixiviado: cadmio (Cd), cromo hexavalente ( $\text{Cr}^{+6}$ ), níquel (Ni) y plomo (Pb).

#### **4.1.3.1 Características de los lodos aceitosos del sistema de Equipo Liviano**

De acuerdo con los valores que presentan las características de peligrosidad de los lodos aceitosos se considera que:

- No es corrosivo, debido a que presenta un pH en solución acuosa de 12,28 unidades.
- No es inflamable, debido a que presenta una inflamabilidad de  $> 250$  °C.
- Presenta una reactividad al ácido sulfhídrico ( $\text{H}_2\text{S}$ ) de  $< 0,10$  mg/kg, siendo el valor regulado por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (USEPA) de 500 mg/kg.
- Presenta una reactividad al ácido cianhídrico (HCN) de  $< 0,10$  mg/kg, siendo el valor regulado por la USEPA de 250 mg/kg.

Con respecto a las características de metales, los parámetros presentan valores inferiores a los señalados en el Decreto N° 2.635, Anexo C, Artículo 5; por lo que se considera no peligroso en su contenido de metales.

En relación a los parámetros en lixiviado, se observan valores inferiores a los reglamentados en el Decreto N° 2.635, Anexo D; por lo que se considera no tóxico para fines de disposición.

#### **4.1.3.2 Características de los lodos aceitosos del sistema de Equipo Pesado**

De acuerdo con los valores que presentan las características de peligrosidad de los lodos aceitosos se considera que:

- No es corrosivo, debido a que presenta un pH en solución acuosa de 10,82 unidades.
- No es inflamable, debido a que presenta una inflamabilidad de  $> 250$  °C.
- Presenta una reactividad al ácido sulfhídrico ( $H_2S$ ) de  $< 0,10$  mg/kg, siendo el valor regulado por la USEPA de 500 mg/kg.
- Presenta una reactividad al ácido cianhídrico (HCN) de  $< 0,10$  mg/kg, siendo el valor regulado por la USEPA de 250 mg/kg.

Con respecto a las características de metales, los parámetros presentan valores inferiores a los señalados en el Decreto N° 2.635, Anexo C, Artículo 5; por lo que se considera no peligroso en su contenido de metales.

En relación a los parámetros de lixiviado, se observan valores inferiores a los reglamentados en el Decreto N° 2.635, Anexo D; por lo que se considera no tóxico para fines de disposición.

## **4.2 COMPARACIÓN DE LAS VARIABLES DE OPERACIÓN CON LAS DE DISEÑO EN LOS EQUIPOS DE LOS SISTEMAS**

En la evaluación del diseño estructural y operacional de las principales unidades de los sistemas como lo son el desarenador y el separador API se compararon las dimensiones reales y operacionales actuales con las de diseño contenidas en la memoria descriptiva de los sistemas y con los estándares recomendados por la bibliografía especializada, estos valores se discutirán en detalle a continuación.

### **4.2.1 Comportamiento del caudal de entrada de los sistemas**

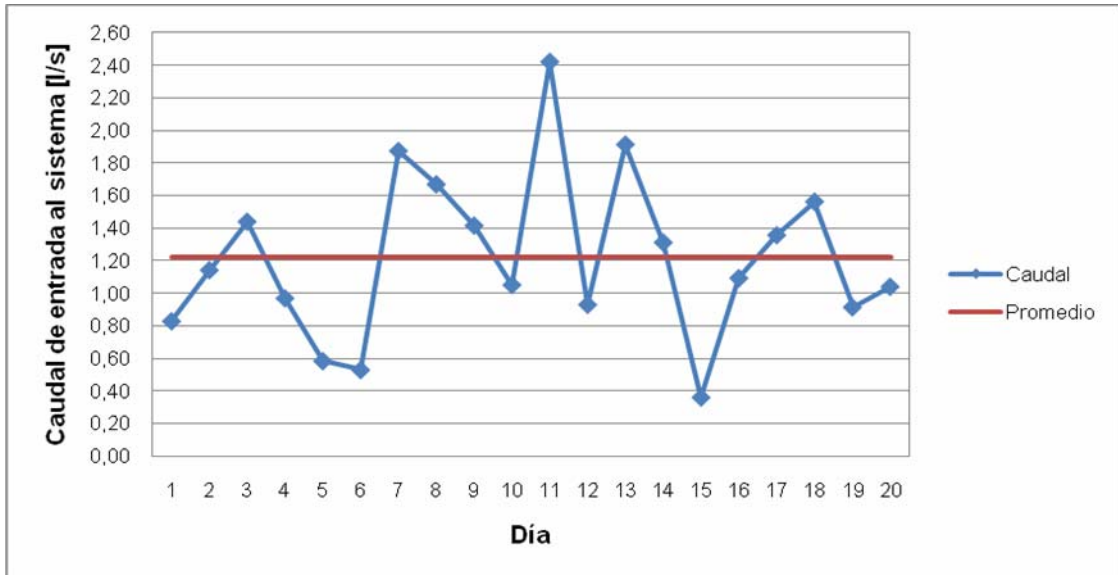
La entrada a los sistemas de tratamiento de aguas aceitosas API tanto de Equipo Liviano como de Equipo Pesado es intermitente, sólo se genera cuando se hace servicio y lavado, siendo el tiempo aproximado de lavado de

equipos livianos 15 minutos y 35 minutos para equipos pesados, la frecuencia puede variar entre 3 a 6 equipos al día, dependiendo de la necesidad de mantenimiento de los mismos y del abastecimiento de los diferentes aceites e hidrocarburos utilizados, ocasionando que los caudales de entrada no sean constantes.

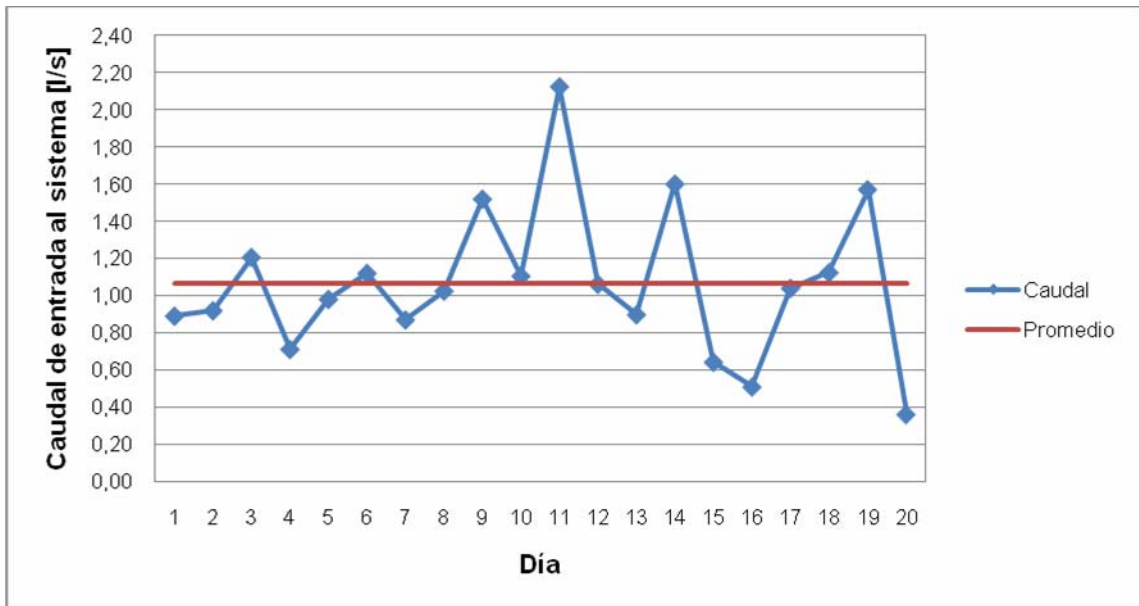
En la figura 4.11 se puede apreciar el comportamiento del caudal promedio al día de la entrada al sistema de Equipo Liviano, presentando un caudal máximo de 2,47 l/s, un caudal mínimo de 0,40 l/s y un promedio total de 1,22 l/s.

En la figura 4.12 se puede apreciar el comportamiento de caudal promedio al día de la entrada al sistema de Equipo Pesado, presentando un caudal máximo de 2,06 l/s, un caudal mínimo de 0,38 l/s y un promedio total de 1,06 l/s.

En la tabla 4.3 se presentan los valores de caudal y rango correspondientes a la entrada a los tanques de agua clarificada y a la fosa de hidrocarburos recuperados de cada sistema, dichos caudales se caracterizan por ser aún más intermitentes que los de la entrada al sistema y presentan mayor dificultad en su medición por su infraestructura.



**Figura 4.11 Comportamiento del caudal promedio al día de la entrada al sistema de Equipo Liviano.**



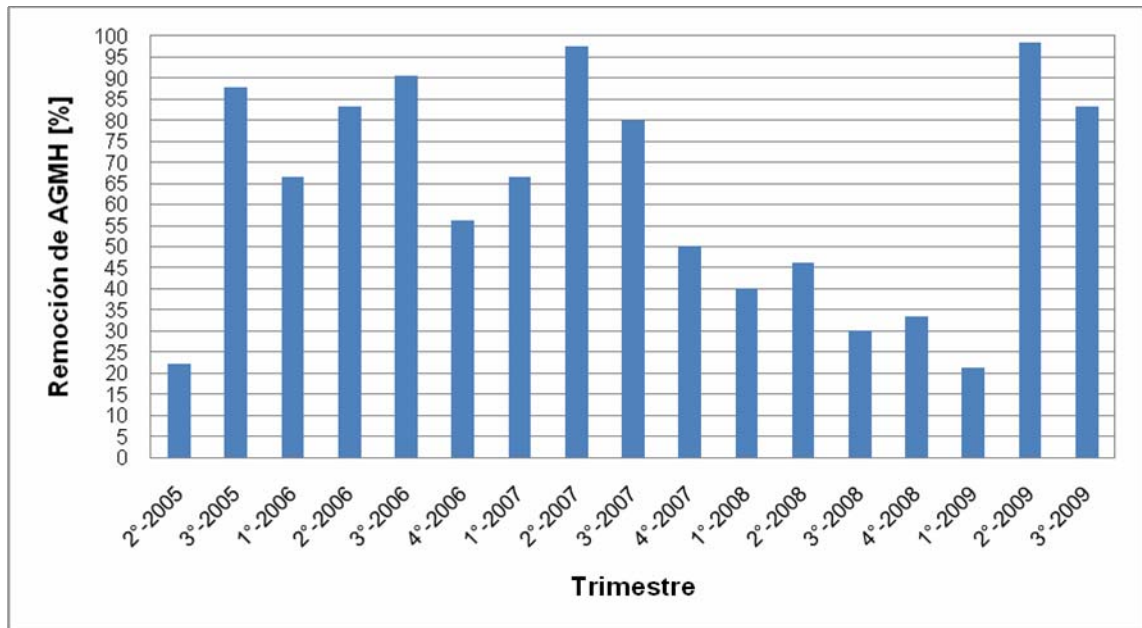
**Figura 4.12 Comportamiento del caudal promedio al día de la entrada al sistema de Equipo Pesado.**

**Tabla 4.3 Promedio, desviación y rango de los caudales a la entrada de los tanques de aguas clarificadas y las fosas de hidrocarburos de los sistemas.**

Entrada	Unidad	Promedio	Desviación	Rango
Tanque aguas c. Equipo Liviano	l/s	0,40	0,08	0,29 - 0,53
Fosa hidrocarburos Equipo Liviano	l/s	0,28	0,05	0,20 - 0,35
Tanque aguas c. Equipo Pesado	l/s	0,38	0,06	0,33 - 0,50
Fosa hidrocarburos Equipo Pesado	l/s	0,27	0,07	0,18 - 0,40

#### **4.2.2 Comportamiento de la eficiencia cronológica de remoción de AGMH de los sistemas**

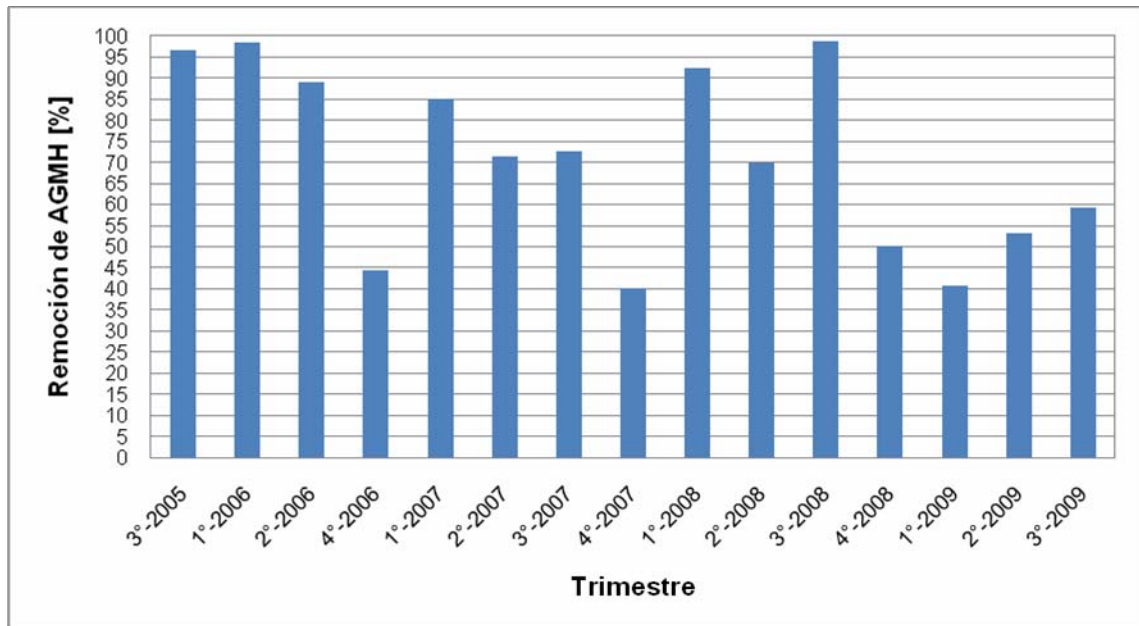
La figura 4.13 es la representación gráfica de la eficiencia cronológica de remoción de AGMH del sistema de tratamiento de Equipo Liviano desde la puesta en marcha hasta la actualidad. Relacionando las figuras 4.3 y 4.13 se puede apreciar que los mayores valores de remoción en los trimestres se obtienen cuando se presentan los mayores valores de AGMH en el afluente, éste comportamiento se debe a que el diseño del sistema es para una alta cantidad de AGMH, es decir, que cuando el valor de AGMH contenido en el afluente es bajo el sistema tiene menor cantidad de aceite e hidrocarburo a remover lo que ocasiona los menores valores de remoción.



**Figura 4.13 Comportamiento de la eficiencia cronológica de remoción de AGMH del sistema de Equipo Liviano.**

La figura 4.14 es la representación gráfica de la eficiencia cronológica de remoción de AGMH del sistema de tratamiento de Equipo Pesado desde la puesta en marcha hasta la actualidad. Relacionando las figuras 4.9 y 4.14 se puede apreciar que los mayores valores de remoción en los trimestres se obtienen cuando se presentan los mayores valores de AGMH en el afluente, éste comportamiento se debe a que el diseño del sistema es para una alta cantidad de AGMH, es decir, que cuando el valor de AGMH contenido en el afluente es bajo el sistema tiene menor cantidad de aceite e hidrocarburo a remover lo que ocasiona los menores valores de remoción.





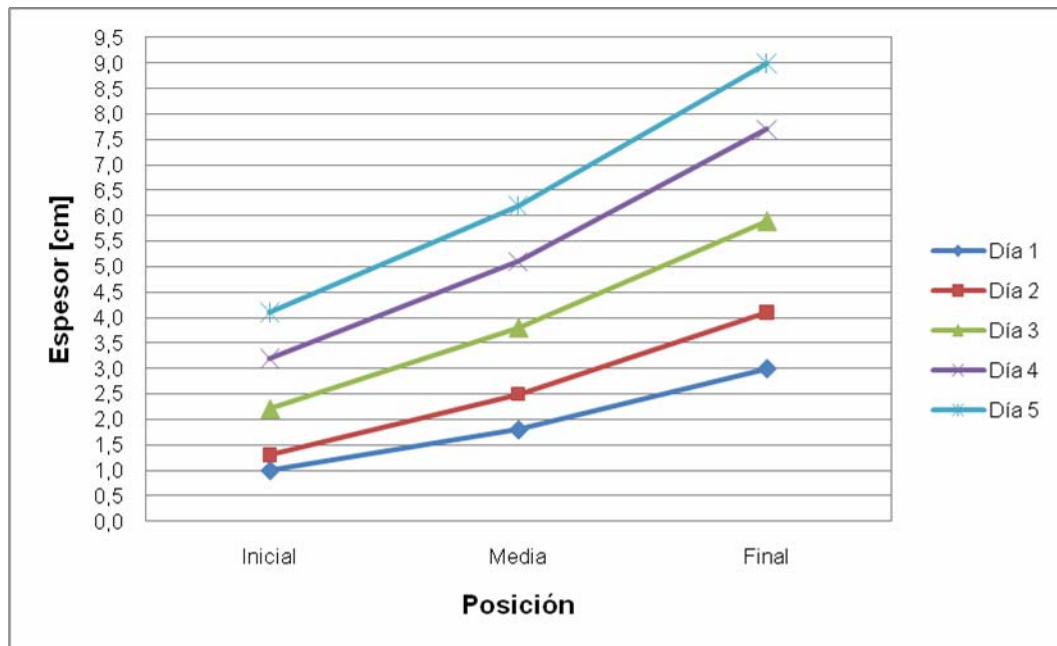
**Figura 4.14 Comportamiento de la eficiencia cronológica de remoción de AGMH del sistema de Equipo Pesado.**

Cabe destacar que a pesar de presentarse eficiencias de remoción de AGMH menores al 50% en los sistemas de tratamiento, la cantidad de este parámetro en el efluente cumple con los límites y/o rangos establecidos por la normativa ambiental vigente.

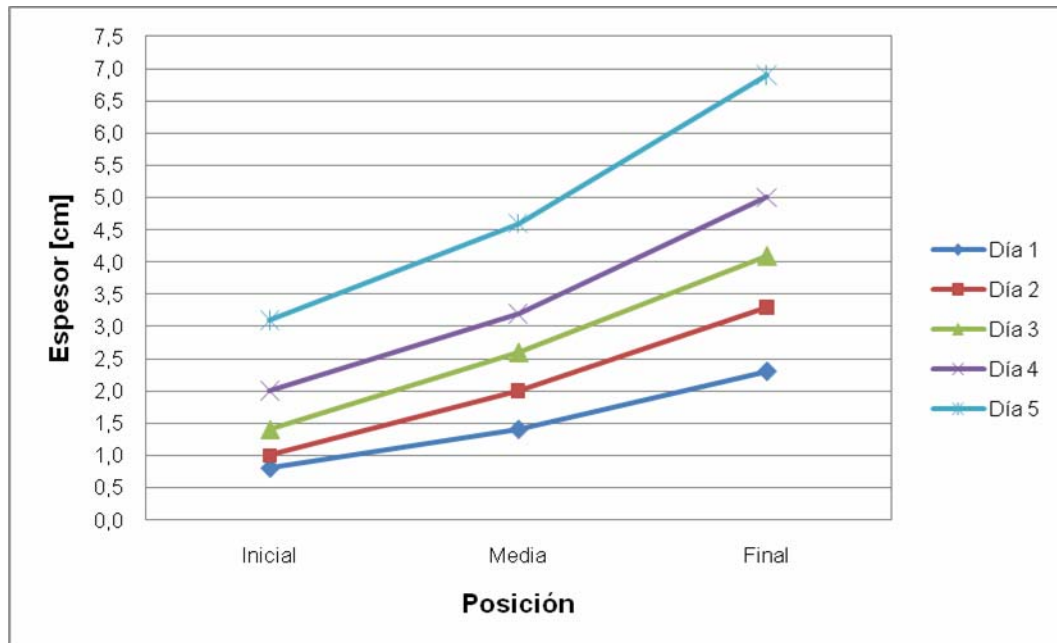
#### **4.2.3 Comportamiento del espesor de la capa de aceite e hidrocarburo en los sistemas**

La entrada de los aceites e hidrocarburos a la fosa de hidrocarburos recuperados depende de la manipulación del desnatador por parte del operador, la cual se realiza una vez por semana o mínimo una vez por cada dos semanas, acción que a su vez depende de la frecuencia de servicios realizados a los equipos, debido a ésto se genera una acumulación de aceites e hidrocarburos en el separador API, por ello se determinó el espesor de la capa de aceite e hidrocarburo y su comportamiento en diferentes

posiciones del separador y se puede apreciar en las figuras 4.15 y 4.16 para el separador de Equipo Liviano y Equipo Pesado respectivamente.



**Figura 4.15 Comportamiento del espesor de la capa de aceite e hidrocarburo a lo largo del separador API de Equipo Liviano.**



**Figura 4.16 Comportamiento del espesor de la capa de aceite e hidrocarburo a lo largo del separador API de Equipo Pesado.**

En las figuras 4.15 y 4.16 se puede observar un crecimiento a través de los días estudiados, indicando una mayor acumulación de aceites e hidrocarburos en la sección final del separador, zona del desnatador, lo que facilita su recolección. Cabe destacar que el valor máximo registrado en la sección final es de 9,00 cm para Equipo Liviano y de 6,90 cm para Equipo Pesado, dichos espesores no superan la pantalla de retención de aceite que es de 60,00 y 40,00 cm del fondo del separador de cada área respectivamente.

#### 4.2.4 Análisis comparativo de las variables de operación con las de diseño

##### 4.2.4.1 Desarenador del sistema de Equipo Liviano

En la tabla 4.4 se presentan los valores de las variables de diseño y de operación del desarenador de Equipo Liviano, donde el caudal de diseño es de 12,00 l/s mientras que el de operación actual es de 1,22 l/s, lo que indica que se está trabajando aproximadamente a un 90% por debajo del caudal de diseño, ésta diferencia entre la composición de diseño y la actual ocasiona que el tiempo de retención hidráulico de operación actual (1,00 h) sea mayor al tiempo de retención hidráulico de diseño (0,10 h).

Los porcentajes de remoción de AGMH (8,00%) y SST (83,35%) de operación actual presentan una mínima diferencia en relación a los porcentajes de remoción de AGMH (5,00%) y SST (87,50%) de diseño.

**Tabla 4.4 Comparación de las variables de operación con las de diseño en el desarenador de Equipo Liviano.**

Parámetro	Condición de diseño	Condición de operación
Caudal agua aceitosa	12,00 l/s	1,22 l/s
Remoción AGMH	5,00%	8,00%
Remoción SST	87,50%	83,35%
Volumen real	4,40 m <sup>3</sup>	4,40 m <sup>3</sup>
Tiempo de retención hidráulico	0,10 h	1,00 h
Tamaño de partícula	> 0,10 mm	> 0,10 mm
Relación longitud profundidad	4,00	4,00
Cantidad de canales	1	1

El tamaño de la partícula a sedimentar fijada en el diseño (> 0,10 mm) concuerda con la bibliografía especializada la cual plantea que los desarenadores convencionales de flujo horizontal pueden sedimentar partículas de tamaño > 0,10 a > 0,20 mm. El valor de la relación longitud

profundidad fijada en el diseño (4,00) es menor al valor recomendado por la bibliografía especializada que es  $\pm 9$  con la intención que la longitud sea mucho mayor a la profundidad para así disminuir el caudal y lograr un mayor tiempo de retención que favorezca la sedimentación. La cantidad de canales recomendada por la bibliografía especializada es dos con el fin de asegurar la continuidad del proceso al momento de realizar mantenimiento mientras que la cantidad estipulada en el diseño es uno haciendo necesaria la parada del sistema de tratamiento al momento del mantenimiento.

Cabe destacar que el desarenador presenta en la mitad del equipo una pantalla semi-sumergida que no permite el paso de la capa de hidrocarburo que se forma en esta unidad al separador API para su posterior desnatación, ésto se puede observar en la figura 4.17. En la figura 4.18 se puede apreciar que la rejilla de entrada al desarenador presenta poca separación entre los nervios lo que imposibilita un mayor paso de lodo al equipo, otro factor que puede producir una acumulación de lodo previa a la unidad es que la entrada al desarenador no cuenta con losas o pendientes que ayuden a la movilización de este lodo.



**Figura 4.17 Desarenador de Equipo Liviano.**



**Figura 4.18** Entrada al desarenador de Equipo Liviano.

En la figura 4.19 se puede observar la existencia de una tubería de 1 ½ pulg, que comunica a la fosa de la tubería de admisión del desarenador con el desarenador, ésta facilita el paso de aguas no controladas al equipo.



**Figura 4.19** Fosa de la tubería de admisión al desarenador de Equipo Liviano.

#### 4.2.4.2 Separador API del sistema de Equipo Liviano

En la tabla 4.5 se presentan los valores de las variables de diseño y de operación del separador API de Equipo Liviano, donde el caudal de diseño es de 36,00 l/s mientras que el de operación actual es de 0,94 l/s, lo que indica que se está trabajando aproximadamente a un 97% por debajo del caudal de diseño, ésta diferencia entre la composición de diseño y la actual ocasiona que el tiempo de retención hidráulico de operación actual (9,31 h) sea mayor al tiempo de retención hidráulico de diseño (0,24 h).

Los porcentajes de remoción de AGMH (81,88%) y SST (85,00%) de operación actual presentan una mínima diferencia en relación a los porcentajes de remoción de AGMH (75,00%) y SST (85,00%) de diseño.

**Tabla 4.5 Comparación de las variables de operación con las de diseño en el separador API de Equipo Liviano.**

Parámetro	Condición de diseño	Condición de operación
Caudal agua aceitosa	36,00 l/s	0,94 l/s
Remoción AGMH	75,00%	81,88%
Remoción SST	85,00%	85,00%
Volumen real	31,49 m <sup>3</sup>	31,49 m <sup>3</sup>
Tiempo de retención hidráulico	0,24 h	9,31 h
Velocidad de flotación	0,21 cm/s	0,21 cm/s
Relación profundidad ancho	0,46	0,46
Cantidad de canales	1	1

El valor de la relación profundidad ancho fijada en el diseño (0,46) se encuentra dentro del rango recomendado por la bibliografía especializada que es de 0,30 a 0,50. La cantidad de canales recomendada por la bibliografía especializada es dos con el fin de asegurar la continuidad del proceso al momento de realizar mantenimiento mientras que la cantidad estipulada en el diseño es uno haciendo necesaria la parada del sistema de tratamiento al momento del mantenimiento.

El separador API, específicamente la tubería que va del desnatador hasta la fosa de hidrocarburos presenta filtración, ésta se puede observar en la figura 4.20. En la figura 4.21 se muestra el sistema de tratamiento de Equipo Liviano. Cabe destacar que el sistema de tratamiento presenta una irregularidad de diseño, debido a la falta de previsión de un método completo de disposición de lodos.



**Figura 4.20 Tubería de entrada a la fosa de hidrocarburos de Equipo Liviano.**





**Figura 4.21 Sistema de tratamiento de Equipo Liviano.**

#### **4.2.4.3 Desarenador del sistema de Equipo Pesado**

En la tabla 4.6 se presentan los valores de las variables de diseño y de operación del desarenador de Equipo Pesado, donde el caudal de diseño es de 9,50 l/s mientras que el de operación actual es de 1,06 l/s, lo que indica que se está trabajando aproximadamente a un 89% por debajo del caudal de diseño, ésta diferencia entre la composición de diseño y la actual ocasiona que el tiempo de retención hidráulico de operación actual (1,04 h) sea mayor al tiempo de retención hidráulico de diseño (0,12 h).

Los porcentajes de remoción de AGMH (5,31%) y SST (86,98%) de operación actual presentan una mínima diferencia en relación a los porcentajes de remoción de AGMH (5,00%) y SST (87,50%) de diseño.

**Tabla 4.6 Comparación de las variables de operación con las de diseño en el desarenador de Equipo Pesado.**

Parámetro	Condición de diseño	Condición de operación
Caudal agua aceitosa	9,50 l/s	1,06 l/s
Remoción AGMH	5,00%	5,31%
Remoción SST	87,50%	86,98%
Volumen real	3,96 m <sup>3</sup>	3,96 m <sup>3</sup>
Tiempo de retención hidráulico	0,12 h	1,04 h
Tamaño de partícula	> 0,10 mm	> 0,10 mm
Relación longitud profundidad	5,45	5,45
Cantidad de canales	1	1

El tamaño de la partícula a sedimentar fijada en el diseño (> 0,10 mm) concuerda con la bibliografía especializada la cual plantea que los desarenadores convencionales de flujo horizontal pueden sedimentar partículas de tamaño > 0,10 a > 0,20 mm. El valor de la relación longitud profundidad fijada en el diseño (5,45) es menor al valor recomendado por la bibliografía especializada que es  $\pm 9$  con la intención que la longitud sea mucho mayor a la profundidad para así disminuir el caudal y lograr un mayor tiempo de retención que favorezca la sedimentación. La cantidad de canales recomendada por la bibliografía especializada es dos con el fin de asegurar la continuidad del proceso al momento de realizar mantenimiento mientras que la cantidad estipulada en el diseño es uno haciendo necesaria la parada del sistema de tratamiento al momento del mantenimiento.

Cabe destacar que la rejilla de entrada al desarenador presenta poca separación entre los nervios lo que imposibilita un mayor paso de lodo al equipo y ocasiona la colmatación en la entrada que a su vez conlleva al desbordamiento de las aguas con diferentes sólidos y su paso no controlado hacia el desarenador, ésto se puede observar en la figura 4.22.



**Figura 4.22 Entrada al desarenador de Equipo Pesado.**

#### **4.2.4.4 Separador API del sistema de Equipo Pesado**

En la tabla 4.7 se presentan los valores de las variables de diseño y de operación del separador API de Equipo Pesado, donde el caudal de diseño es de 9,50 l/s mientras que el de operación actual es de 0,86 l/s, lo que indica que se está trabajando aproximadamente a un 91% por debajo del caudal de diseño, ésta diferencia entre la composición de diseño y la actual ocasiona que el tiempo de retención hidráulico de operación actual (2,16 h) sea mayor al tiempo de retención hidráulico de diseño (0,20 h). Los porcentajes de remoción de AGMH (57,10%) y SST (83,83%) de operación actual presentan una mínima diferencia en relación a los porcentajes de remoción de AGMH (75,00%) y SST (85,00%) de diseño.

**Tabla 4.7 Comparación de las variables de operación con las de diseño en el separador API de Equipo Pesado.**

Parámetro	Condición de diseño	Condición de operación
Caudal agua aceitosa	9,50 l/s	0,86 l/s
Remoción AGMH	75,00%	57,10%
Remoción SST	85,00%	83,83%
Volumen real	6,70 m <sup>3</sup>	6,70 m <sup>3</sup>
Tiempo de retención hidráulico	0,20 h	2,16 h
Velocidad de flotación	0,21 cm/s	0,21 cm/s
Relación profundidad ancho	0,74	0,74
Cantidad de canales	1	1

El valor de la relación profundidad ancho fijada en el diseño (0,74) se encuentra fuera del rango recomendado por la bibliografía especializada que es de 0,30 a 0,50. La cantidad de canales recomendada por la bibliografía especializada es dos con el fin de asegurar la continuidad del proceso al momento de realizar mantenimiento mientras que la cantidad estipulada en el diseño es uno haciendo necesaria la parada del sistema de tratamiento al momento del mantenimiento.

En la figura 4.23 se muestra el sistema de tratamiento de Equipo Liviano. Cabe destacar que el sistema de tratamiento presenta una irregularidad de diseño, debido a la falta de previsión de un método completo de disposición de lodos.



**Figura 4.23 Sistema de tratamiento de Equipo Pesado.**

### **4.3 PRESENTACIÓN DE PROPUESTA DE MEJORA A LOS MÉTODOS UTILIZADOS PARA LA DISPOSICIÓN DE LOS EFLUENTES**

Con la finalidad de darle continuidad a los métodos de disposición actual de las aguas clarificadas y lodos debido a que se cuenta con la mayor parte de la infraestructura y con los permisos por parte del MPPA para tales disposiciones, se propone la adaptación del sistema de llenado de cisternas convencionales al cisterna industrial tipo Klein 777D para la disposición de las aguas clarificadas en función de su reutilización y en el caso de los lodos se propone la construcción e incorporación de un lecho de secado de lodo al sistema de tratamiento de aguas aceitosas (API) de cada área, disminuyendo así el impacto ambiental y los focos de contaminación que se generan con el uso de zanjas en diferentes áreas.

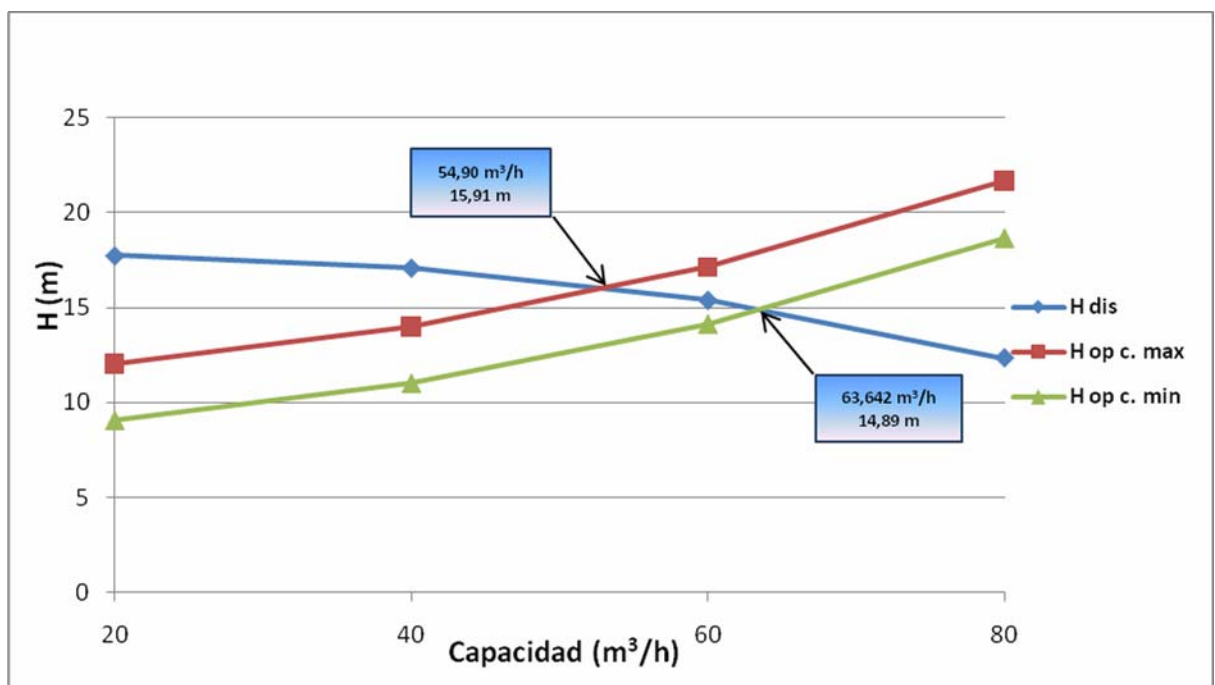
#### **4.3.1 Método de disposición de las aguas clarificadas**

Con la adaptación del sistema de llenado de cisternas convencionales al cisterna industrial tipo Klein 777D se puede mantener y efectuar el método

de disposición de aguas clarificadas en el rego de vías no pavimentadas, donde el procedimiento del método es análogo al expuesto en el punto 3.3.1.

#### 4.3.1.1 Adaptación del sistema de llenado de cisternas convencionales al cisterna industrial tipo Klein 777D

En la figura 4.24 los puntos señalados representan el máximo caudal de operación hasta el cual la bomba es capaz de trabajar para el sistema en estudio sin comprometer su integridad mecánica. Para cabezal estático mínimo el caudal máximo fue de 63,6420 m<sup>3</sup>/h a 14,89 m de cabezal y a cabezal estático máximo resulto 54,90 m<sup>3</sup>/h a 15,91 m.



**Figura 4.24 Curva característica de diseño vs curva característica de operación de la bomba del sistema de llenado.**

En operación normal al sistema se le exige llenar un cisterna de 8.000 litros en 12 minutos, lo que equivale a un caudal de 11,11 l/s (40 m<sup>3</sup>/h), comparando este valor con los caudales máximos obtenidos para el sistema,

se puede determinar que las modificaciones a realizar en el sistema no van a afectar la operación del mismo, es decir, que desde el punto de vista hidráulico se pueden llevar a cabo dichas modificaciones.

#### **4.3.2 Método de disposición de lodos**

A continuación se presenta de forma sencilla el procedimiento para la disposición de lodo con la incorporación del lecho de secado y su mecanismo:

- a. El día a realizar el mantenimiento del sistema de tratamiento el operador debe recolectar la mayor cantidad de la capa de hidrocarburo presente en el separador API con el uso del desnatador.
- b. Los operadores del camión de vacío deberán succionar la mayor cantidad de agua aceitosa del separador API evitando succionar los lodos decantados en el fondo de dicha unidad, esta agua aceitosa se descargará en el canal de entrada del desarenador del sistema de tratamiento de la otra área el cual estará en funcionamiento. Ésta acción se realizará con el propósito de reducir la cantidad de agua y aceite a remover del lodo en el lecho de secado.
- c. Los operadores del camión de vacío deberán succionar el resto de material contenido en el separador API y el desarenador, es decir, el lodo y el agua restante.
- d. Descargar la mezcla de lodo y agua sobre el lecho de secado, de ser necesario usar una pala para distribuirlo sobre toda el área superficial del lecho y verificar que el espesor de la capa de lodo aplicado se encuentre en el rango de 20 a 25 cm. No se deberá esparcir lodo en el lecho de secado cuando éste ya contenga una carga anterior en fase de secado.
- e. El operador del sistema de tratamiento deberá llevar un control de drenaje del fondo del lecho, consistente en una verificación visual del escurrimiento del líquido percolado hacia el canal de entrada del

desarenador, la mayor parte del agua libre puede removerse entre 1 a 2 días. En caso que el escurrimiento sea mínimo o no se produzca, se concluirá que el medio filtrante, básicamente la camada de arena, se ha colmatado.

- f. Pasado el periodo de drenaje y escurrimiento del líquido percolado, el secado seguirá básicamente por medio de la evaporación del agua, proceso de deshidratación más lento y que está relacionado con la temperatura, humedad relativa y velocidad del viento.
- g. Se formará una capa de lodo cada vez más pobre en agua y se observará una reducción de volumen tanto en dirección vertical como horizontal. A partir de éste momento se comenzará a ver la formación de grietas que sumado a la remoción manual con arqueta o rastrillo, permitirá acelerar el proceso de evaporación porque aumenta la superficie expuesta al aire.
- h. El tiempo para el secado completo de lodo variará con las condiciones climáticas y meteorológicas imperantes, a manera general puede considerarse entre 20 y 30 días.
- i. Se retirará la capa de lodo seco del lecho en forma manual por parte de personal obrero y se depositará en un patio de materia prima, ya sea el patio de esquisto San José u otro más cercano previamente asignado por la gerencia de calidad y ambiente.
- j. Se mesclará el lodo con el material de dicho patio para luego ser introducidos como parte de la materia prima al proceso de producción de cemento.

#### **4.3.2.1 Mantenimiento del lecho de secado**

El mantenimiento del lecho de secado del lodo consistirá en reemplazar la arena perdida durante la remoción del lodo seco por arena nueva de igual



característica a la señalada en la bibliografía especializada, igualmente, se debe prevenir el crecimiento de hierbas o vegetales de todo tipo.

En el caso eventual de que el lecho muestre una tendencia a colmatarse, toda la camada de arena debe reemplazarse por arena de una granulometría mayor en cuanto a la gradación y tamaño efectivo.

#### **4.4 ESTIMACIÓN DE LOS COSTOS DE LA PROPUESTA DE MEJORA A LOS MÉTODOS UTILIZADOS PARA LA DISPOSICIÓN DE LOS EFLUENTES**

Los costos de la propuesta de mejora a los métodos utilizados actualmente para la disposición de los efluentes representan un estimado de costos clase V, ya que se basaron en datos previos sobre costos de proyectos similares, teniendo en cuenta detalles de diseño y haciendo los ajustes correspondientes, estos datos de proyectos similares fueron facilitados por el departamento de Vicepresidencia Técnica de Planta Pertigalete.

En la tabla 4.8 se presentan los valores del estimado de costo para la adaptación del sistema de llenado de cisternas convencionales al cisterna industrial tipo Klein 777D y el estimado de costo del lecho de secado, además se muestra la inversión total en cada mejora al aplicarse en los dos sistemas de tratamiento.

Cabe destacar que la aplicación de esta propuesta de mejora producirá un beneficio a corto y largo plazo, relacionado a la conservación del ambiente así como también el cumplimiento de la normativa ambiental vigente, ya que se disminuirá el impacto ambiental y los focos de contaminación generados por el uso de zanjas para el secado de lodos aceitosos y se le dará un reuso a las aguas clarificadas.

**Tabla 4.8 Estimado de costo de la propuesta de mejora.**

Propuesta de mejora	Inversión para un sistema [Bs]	Inversión para dos sistemas [Bs]
Adaptación del sistema de llenado	14.208,45	28.416,90
Lecho de secado	12.223,85	24.447,70

#### 4.5 CONCLUSIONES

1. El efluente del sistema de tratamiento de Equipo Liviano y Equipo Pesado presenta que los valores de los parámetros cumplen con los límites y/o rangos establecidos en la normativa ambiental vigente, mientras que desde la puesta en marcha de los sistemas, el parámetro sulfuro ha presentado algunos valores atípicos a la tendencia general sobrepasando en 0,5 mg/l el límite máximo permitido que es 0,5 mg/l.
2. De acuerdo al informe recopilado de la caracterización de lodos de Equipo Liviano y Equipo Pesado, el lodo no presenta características de peligrosidad.
3. El comportamiento del espesor de la capa de aceite e hidrocarburos en el separador de los sistemas presentan un crecimiento a través de los días estudiados, indicando una mayor acumulación en la sección final del separador, siendo su máximo valor registrado de 9,00 y 6,90 cm para Equipo Liviano y Equipo Pesado respectivamente.
4. El caudal de diseño del desarenador de Equipo Liviano es de 12,00 l/s y el de operación actual es de 1,22 l/s, lo que indica que se está trabajando aproximadamente a un 90% por debajo del caudal de diseño.
5. El desarenador de Equipo Liviano presenta un tiempo de retención hidráulico de operación actual (1,00 h) mayor al tiempo de retención de diseño (0,10 h).
6. Los porcentajes de remoción de AGMH (8,00%) y de SST (83,35%) de operación actual del desarenador de Equipo Liviano presentan una mínima diferencia a los porcentajes de remoción de AGMH (5,00%) y de SST (87,50%) de diseño.
7. El separador API de Equipo Liviano posee un caudal de diseño de 36,00 l/s y de operación actual de 0,94 l/s, lo que indica que se está trabajando aproximadamente a un 97% por debajo del caudal de diseño.

8. El separador API de Equipo Liviano presenta un tiempo de retención hidráulico de operación actual (9,31 h) mayor al tiempo de retención de diseño (0,24 h).
9. El separador API de Equipo Liviano tiene un porcentaje de remoción de AGMH (81,88%) y de SST (85,00%) de operación actual, presentándose una mínima diferencia a los porcentajes de remoción de AGMH (75,00%) y de SST (85,00%) de diseño.
10. El caudal de diseño del desarenador de Equipo Pesado es de 9,50 l/s y el de operación actual es de 1,06 l/s, lo que indica que se está trabajando aproximadamente a un 89% por debajo del caudal de diseño.
11. El desarenador de Equipo Liviano presenta un tiempo de retención hidráulico de operación actual (1,04 h) mayor al tiempo de retención de diseño (0,12 h).
12. Los porcentajes de remoción de AGMH (5,31%) y de SST (86,98%) de operación actual del desarenador de Equipo Pesado presentan una mínima diferencia a los porcentajes de remoción de AGMH (5,00%) y de SST (87,50%) de diseño.
13. El separador API de Equipo Pesado posee un caudal de diseño de 9,50 l/s y de operación actual de 0,86 l/s, lo que indica que se está trabajando aproximadamente a un 91% por debajo del caudal de diseño.
14. El separador API de Equipo Pesado presenta un tiempo de retención hidráulico de operación actual (2,16 h) mayor al tiempo de retención de diseño (0,20 h).
15. El separador API de Equipo Pesado tiene un porcentaje de remoción de AGMH (57,10%) y de SST (83,83%) de operación actual, presentándose una mínima diferencia a los porcentajes de remoción de AGMH (75,00%) y de SST (85,00%) de diseño.
16. Se propuso la adaptación del sistema de llenado de cisternas convencionales al cisterna industrial tipo Klein 777D para darle

continuidad al aprovechamiento de aguas clarificadas en el riego de vías no pavimentadas como método de disposición.

17. Se determinó desde el punto de vista hidráulico que se puede llevar a cabo la adaptación del sistema de llenado para darle continuidad al método de disposición de las aguas clarificadas sin comprometer la integridad mecánica de las bombas del sistema.
18. Se propuso la construcción e incorporación de un lecho de secado de lodo a cada sistema de tratamiento para darle continuidad a la reutilización del lodo como parte de la materia prima del proceso de producción de cemento.
19. El estimado de costo de la adaptación del sistema de llenado de cisternas convencionales al cisterna industrial tipo Klein 777D es de 14.208,45 Bs para un sistema de tratamiento y de 28.416,90 Bs para los dos sistemas de tratamiento de aguas aceitosas (API).
20. El estimado de costo de la construcción e incorporación del lecho de sacado de lodo es de 12.223,85 Bs para un sistema de tratamiento y de 24.447,70 Bs para los dos sistemas de tratamiento de aguas aceitosas (API).

#### 4.6 RECOMENDACIONES

1. Emplear desengrasante y champús de carácter neutro en el lavado de vehículos ya que el uso de desengrasante y champús de carácter alcalino es un factor que promueve altos niveles del parámetro pH.
2. Efectuar un mantenimiento continuo y constante de los sistemas de tratamiento así como el achicamiento del tanque de aguas clarificadas para evitar que colapse el sistema y se cree una condición de septización donde se liberan sulfuros por acción de las bacterias.
3. Cumplir con el cronograma de mantenimiento de las unidades de los sistemas de tratamiento de aguas aceitosas (API), no debe transcurrir más de un mes entre cada mantenimiento.
4. Eliminar o modificar la pantalla que se encuentra en la mitad del desarenador de Equipo Liviano, permitiendo así el paso de la capa de hidrocarburo que se forma en esta unidad al separador API para su posterior desnatación.
5. Modificar la rejilla de entrada al desarenador de ambas áreas, aumentando el espacio entre los nervios de la rejilla para permitir un mayor paso de lodo al equipo.
6. Construir una losa con pendiente hacia la entrada del desarenador de Equipo Liviano para evitar la acumulación de lodo en el área previa al desarenador.
7. Instalar una válvula de cierre rápido en la tubería de diámetro 1 ½ pulg, que comunica a la fosa de la tubería de admisión del desarenador con el desarenador de Equipo Liviano para evitar el paso de aguas no controladas.
8. Corregir la filtración de la tubería que va del desnatador hasta la fosa de hidrocarburo recuperado de Equipo Liviano.

## BIBLIOGRAFÍA

American Petroleum Institute. **“Manual on disposal of refinery wastes”**, Volume on liquid wastes. USA (1969).

American Petroleum Institute. **“Monographs on refinery environmental count managent of waste discharge design and operation”**, Frist edition. API, Publication. USA (1990).

Cemex Venezuela SACA. **“Proceso de fabricación de cemento”**, Manual de curso. Puerto La Cruz (1990).

Correa, A. **“Determinación de las causas del alto contenido de aceites y grasas a la salida del tratamiento primario de una planta de efluentes industriales en un complejo mejorador de crudo extra pesado”**, Trabajo de Grado, Departamento de Ingeniería Química, Universidad de Oriente, Núcleo Anzoátegui, Puerto La Cruz (2005).

Crane, H. **“Flujo de fluidos en válvulas, accesorios y tuberías”**. Primera edición. Editorial McGraw-Hill. México (1992).

Crites, R., Tchobanoglous, G. **“Sistema de manejo de aguas residuales para núcleos pequeños y descentralizados”**. Tomo II. Primera edición. Editorial McGraw-Hill. Colombia (2000).

Dibella, A. **“Comportamiento operacional del sistema de tratamiento de efluentes industriales del mejorador Operadora Cerro Negro bajo**

**condiciones de arranque**”, Trabajo de Grado, Departamento de Ingeniería Química, Universidad de Oriente, Núcleo Anzoátegui, Puerto La Cruz **(2002)**.

Eckenfelder, J., Wesley, W. **“Industrial water pollution”**. Third edition. McGraw-Hill. USA **(2000)**.

Field, B. **“Economía ambiental”**. Primera edición. Editorial McGraw-Hill. Colombia **(1995)**.

Gerad, K. **“Ingeniería ambiental: fundamentos, entornos, tecnologías y sistemas de gestión”**. Volumen I y II. Editorial McGraw-Hill. España **(1999)**.

La Greca, M., Buckingham, P., Evans, J. **“Gestión de residuos tóxicos”**. Volumen II. Editorial McGraw-Hill. México **(1996)**.

Marín, J. **“Estudio del aprovechamiento de los lodos residuales provenientes de la planta de tratamiento de aguas industriales de una empresa ensambladora de vehículos automotores”**, Trabajo de Grado, Departamento de Ingeniería Química, Universidad de Oriente, Núcleo Anzoátegui, Puerto La Cruz **(2004)**.

McNaughton, K. **“Bombas, selección, uso y mantenimiento”**. Primera edición. Editorial McGraw-Hill. México **(1990)**.

Metcalf, M., Eddy, E. **“Ingeniería de las aguas residuales, tratamiento, vertido y reutilización”**. Tercera edición. Editorial McGraw-Hill. México **(1996)**.



Nitsche, L. **“Evaluación del separador API, refinería PLC, CORPOVEN”**, Trabajo de Grado, Departamento de Ingeniería Química, Universidad de Oriente, Núcleo Anzoátegui, Puerto La Cruz **(1994)**.

Ochoa, K. **“Determinación de la factibilidad técnico-económica del tratamiento y reutilización de los efluentes de las unidades de procesos y de los servicios industriales de la refinería de Puerto La Cruz”**, Trabajo de Grado, Departamento de Ingeniería Química, Universidad de Oriente, Núcleo Anzoátegui, Puerto La Cruz **(2006)**.

Orue, M. **“Tratamiento de aguas”**, Departamento de Procesos, IUTET. Caracas **(1984)**.

PDVSA. **“Cálculo hidráulico de tuberías”**. Caracas **(1994)**.

PDVSA. **“Evaluación económica de propuestas de inversión”**. Caracas **(2001)**.

PDVSA. **“Tratamiento y disposición de aguas de producción”**. Caracas **(1999)**.

Petrozuata. **“Manual de tratamiento de efluentes industriales”**, Gerencia Técnica de Ingeniería de Procesos, Jose-Estado Anzoátegui **(1999)**.

Reyes, A. **“Evaluación de diferentes sistemas de tratamiento para el acondicionamiento y reuso de los efluentes industriales generados en la refinería de Puerto La Cruz, PDVSA”**, Trabajo de Grado, Departamento de Ingeniería Química, Universidad de Oriente, Núcleo Anzoátegui, Puerto La Cruz **(2008)**.

Tebbut, T. **“Fundamentos de control de la calidad del agua”**. Primera edición. Editorial Limusa SA. México (1998).

Varsinca Ingenieros Consultores. **“Reingeniería sistema de aguas aceitosas planta Pertigalete áreas Serosa, E/S Equipo Liviano y E/S Cantera. Ingeniería básica”**, Puerto La Cruz (2004).

## **METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y ASCENSO**

<b>TÍTULO</b>	Evaluación del funcionamiento de los sistemas de tratamiento de aguas aceitosas (API) de una planta cementera
<b>SUBTÍTULO</b>	

AUTOR (ES):

<b>APELLIDOS Y NOMBRES</b>	<b>CÓDIGO CULAC / E MAIL</b>
Juan C, Poblador V.	<b>CVLAC:</b> V-18.280.841 <b>E MAIL:</b> juanpo_86@hotmail.com
	<b>CVLAC:</b> <b>E MAIL:</b>
	<b>CVLAC:</b> <b>E MAIL:</b>
	<b>CVLAC:</b> <b>E MAIL:</b>

**PALABRAS O FRASES CLAVES:**

Separador API

Aguas aceitosas

Desarenador

Lecho de secado de lodos

Métodos de disposición de aguas clarificadas y lodos

CEMEX

**METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y ASCENSO:**

ÁREA	SUBÁREA
Ingeniería y ciencias aplicadas	Ingeniería Química

**RESUMEN (ABSTRACT):**

Con el objetivo de realizar la evaluación del funcionamiento de los sistemas de tratamiento de aguas aceitosas (API) y los métodos utilizados para la disposición de sus efluentes de la planta Pertigalete, Cemex Venezuela SACA, Empresa en Transición, se recopilaron los parámetros fisicoquímicos de los efluentes de los sistemas; la recopilación se basó en los informes de resultado de los análisis fisicoquímicos realizados trimestralmente desde la puesta en marcha de los sistemas. También se compararon las variables de operación con las de diseño, siendo lo más resaltante que los porcentajes de remoción de aceites, grasas minerales e hidrocarburos y de sólidos suspendidos totales de operación actual de las unidades, desarenador Equipo Liviano, separador API Equipo Liviano, desarenador Equipo Pesado y separador API Equipo Pesado. Además se presentó una propuesta de mejora a los métodos utilizados para la disposición de los efluentes. Para la disposición de las aguas clarificadas se propuso la adaptación del sistema de llenado de cisternas convencionales al cisterna industrial tipo Klein 777D y en el caso de los lodos se propuso la construcción e incorporación de un lecho de secado de lodo al sistema de tratamiento de aguas aceitosas de cada área, disminuyendo el impacto ambiental, los focos de contaminación y logrando el cumplimiento de la normativa ambiental vigente. Por último se estimaron los costos de la propuesta de mejora a los métodos utilizados para la disposición de los efluentes.

**METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y ASCENSO:****CONTRIBUIDORES:**

APELLIDOS Y NOMBRES	ROL / CÓDIGO CVLAC / E_MAIL				
	ROL	CA	AS X	TU	JU
Raven, Hernán	CVLAC:	V- 4.136.007			
	E_MAIL	hraven1@yahoo.com			
	E_MAIL				
Meneses, Rebeca	ROL	CA	AS	TU X	JU
	CVLAC:	V-11.831.619			
	E_MAIL	rebecameneses@cdv.com			
	E_MAIL				
Cova, Alexis	ROL	CA	AS	TU	JU X
	CVLAC:	V-11.905.328			
	E_MAIL	alexiscovab@gmail.com			
	E_MAIL				
Arias, Ronald	ROL	CA	AS	TU	JU X
	CVLAC:	V-13.498.859			
	E_MAIL	ronaldariasc@gmail.com			
	E_MAIL				

**FECHA DE DISCUSIÓN Y APROBACIÓN:**

2010	11	5
<b>AÑO</b>	<b>MES</b>	<b>DÍA</b>

**LENGUAJE. SPA**

**METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y ASCENSO:****ARCHIVO (S):**

NOMBRE DE ARCHIVO	TIPO MIME
TESIS.Evaluación_sistemasdetratamientodeaguasaceitosas_plantacem ente ra.doc	Application/msword

**CARACTERES EN LOS NOMBRES DE LOS ARCHIVOS:** A B C D E F G H I J K L M N O P Q  
R S T U V W X Y Z . a b c d e f g h i j k l m n o p q r s t u v w x y z . 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 .

**ALCANCE****ESPACIAL:** | (OPCIONAL)**TEMPORAL:** (OPCIONAL)**TÍTULO O GRADO ASOCIADO CON EL TRABAJO:**Ingeniero Químico**NIVEL ASOCIADO CON EL TRABAJO:**Pregrado**ÁREA DE ESTUDIO:**Ingeniería de procesos**INSTITUCIÓN:**Universidad de Oriente. Núcleo de Anzoátegui

**METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y ASCENSO:****DERECHOS**

De acuerdo con el artículo 41 del reglamento de Trabajo de Grado de la Universidad de Oriente: “Los Trabajos de Grado son de exclusiva propiedad de la Universidad de Oriente y sólo podrán ser utilizados por otros fines con el consentimiento del consejo de núcleo respectivo, quien lo participará al consejo universitario”.

**Juan C, Poblador V**  
**AUTOR**

**Hernán Raven**  
**TUTOR**

**Alexis Cova**  
**JURADO**

**Ronald Arias**  
**JURADO**

**Yraima Salas**  
**POR LA SUBCOMISIÓN DE TESIS**