



UNIVERSIDAD DE  
**COSTA RICA**

FACULTAD DE INGENIERÍA  
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA

**DISEÑO PARAMETRIZADO DE UN  
SEPARADOR MODULAR DE  
AGUA-HIDROCARBUROS PARA  
CENTRALES DE GENERACIÓN  
ELÉCTRICA**

Trabajo final de graduación sometido a la consideración de la

UNIVERSIDAD DE COSTA RICA

como parte de los requisitos  
para aspirar al título y grado de

LICENCIATURA EN INGENIERÍA MECÁNICA

**Mauricio Barrantes Murillo B10851**  
**Alejandro Martínez Arana B03701**  
**Marco Andrés Rodríguez Solano B05409**

Ciudad Universitaria Rodrigo Facio  
Enero de 2017

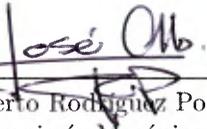
# Hoja de tribunal

Este proyecto de graduación fue aceptado por la Comisión de Trabajos Finales de Graduación de la Escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad de Costa Rica, como requisito parcial para optar por el grado y título de Licenciatura en Ingeniería Mecánica.



Representante de la Unidad Académica

Dr. Eduardo Calderón Obaldía  
Escuela de Ingeniería Mecánica



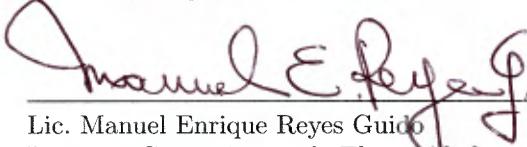
Asesor director

Lic. José Alberto Rodríguez Porras  
Escuela de Ingeniería Mecánica



Asesor interno

Mag. Juan Gabriel Monge Gapper  
Escuela de Ingeniería Mecánica



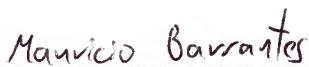
Asesor externo

Lic. Manuel Enrique Reyes Guido  
Instituto Costarricense de Electricidad



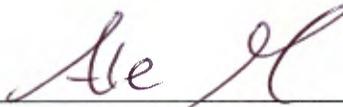
Docente curso Proyecto Mecánico II

Mag. Marco Vinicio Calvo Vargas  
Escuela de Ingeniería Mecánica



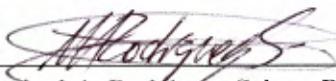
Ponente

Mauricio Barrantes Murillo B10851



Ponente

Alejandro Martínez Arana B03701



Ponente

Marco Andrés Rodríguez Solano B05409

## Agradecimientos

*A nuestros familiares, amigos y compañeros presentes en este proceso que siempre nos han apoyado.*

## Dedicatoria

*A todos los que nos han acompañado en este camino de lucha y aprendizaje constante para llegar a ser profesionales íntegros.*

## Epígrafe

*"Nunca consideres el estudio  
como una obligación, sino como  
una oportunidad para penetrar en  
el bello y maravilloso mundo del  
saber".*

---

Albert Einstein

# Índice general

Hoja de tribunal . . . . .	I
Agradecimientos . . . . .	II
Dedicatoria . . . . .	III
Epígrafe . . . . .	IV
Índice de ilustraciones . . . . .	X
Índice de cuadros . . . . .	XI
Simbología . . . . .	XII
Abreviaturas . . . . .	XIII
Resumen . . . . .	XIV
<b>1. Introducción . . . . .</b>	<b>1</b>
1.1. Descripción general . . . . .	1
1.2. Objetivos . . . . .	1
1.2.1. Objetivo general . . . . .	1
1.2.2. Objetivos específicos . . . . .	2
1.3. Justificación . . . . .	2
1.4. Antecedentes . . . . .	3
1.5. Metodología . . . . .	3
1.6. Alcances . . . . .	4
<b>2. Marco teórico . . . . .</b>	<b>6</b>
2.1. Características de las aguas residuales . . . . .	6
2.1.1. Vías de contaminación del agua . . . . .	6
2.1.2. Parámetros generales para medir la contaminación del agua . . . . .	7
2.1.3. Contaminación ambiental debido a hidrocarburos . . . . .	8
2.1.4. Fuentes de contaminación en las centrales eléctricas . . . . .	9
2.2. Tratamiento de aguas en centrales de generación eléctrica . . . . .	10
2.2.1. Métodos de tratamiento de aguas residuales . . . . .	10
2.2.2. Selección del método de tratamiento . . . . .	13
2.2.3. Separación . . . . .	14
2.2.4. Funciones del proceso de separación de aguas residuales . . . . .	14
2.3. Separadores de agua-hidrocarburos . . . . .	15
2.4. Normas utilizadas en el diseño de separadores de agua-hidrocarburos . . . . .	21
2.4.1. Marco Legal-Ambiental Ley N° 33601 . . . . .	21
2.4.2. Norma API 421 . . . . .	22
2.4.3. Norma ASTM A36 . . . . .	26
2.4.4. Normas ANSI-ASME . . . . .	26
2.4.5. Norma API 650 . . . . .	27
2.5. Conformación general del separador . . . . .	29
2.5.1. Cámaras o secciones del separador . . . . .	29
2.5.2. Jets o deflectores de entrada cóncavos . . . . .	30
2.5.3. Baffles o laberintos removibles . . . . .	31

2.5.4.	Cejillas móviles deslizables . . . . .	31
2.5.5.	Recolectores de aceite-hidrocarburos . . . . .	32
2.5.6.	Tubos sifón . . . . .	32
2.6.	Sedimentación de lodos en el separador . . . . .	32
<b>3.</b>	<b>Diseño del separador</b>	<b>34</b>
3.1.	Dimensionamiento del cuerpo principal . . . . .	34
3.2.	Dimensionamiento de la sección de pre separación . . . . .	42
3.3.	Configuración y dimensionamiento de celosías de desvío y baffles . . . . .	43
3.4.	Recolectores . . . . .	47
3.5.	Cálculo de previstas para remoción de los lodos en el separador . . . . .	48
3.6.	Dimensionamiento de jets en la zona de turbulencia . . . . .	49
<b>4.</b>	<b>Sistemas auxiliares e instrumentación</b>	<b>52</b>
4.1.	Calefacción eléctrica . . . . .	52
4.2.	Aislamiento térmico . . . . .	54
4.3.	Tuberías . . . . .	56
4.3.1.	Tuberías de entrada y salida del separador . . . . .	57
4.3.2.	Tuberías de extracción de lodos en separador . . . . .	58
4.4.	Válvulas y accesorios . . . . .	58
4.5.	Bombas para recolección de lodos de fondo . . . . .	59
4.6.	Bombas para recolección de aceite-hidrocarburos . . . . .	61
4.7.	Detectores de nivel de agua en separador . . . . .	62
4.8.	Detectores de nivel de hidrocarburos en recolectores . . . . .	65
<b>5.</b>	<b>Diseño estructural mecánico</b>	<b>68</b>
5.1.	Selección de materiales para paredes, piso y cubierta . . . . .	68
5.2.	Preparación de superficie y pintura . . . . .	69
5.2.1.	Preparación de la superficie . . . . .	70
5.2.2.	Selección del recubrimiento . . . . .	70
5.3.	Cálculo de esfuerzos en paredes y piso del separador . . . . .	72
5.4.	Determinación de soportes estructurales . . . . .	74
5.5.	Selección del tipo de soldaduras . . . . .	76
5.5.1.	Soldadura en unión pared-fondo . . . . .	77
5.5.2.	Soldadura de paredes . . . . .	78
5.5.3.	Soldadura de fondo . . . . .	80
<b>6.</b>	<b>Mantenimiento y operación</b>	<b>82</b>
6.1.	Selección de elevadores para extracción de los laberintos (baffles) . . . . .	82
6.2.	Protocolo general de mantenimiento . . . . .	84
6.2.1.	Limpieza parcial . . . . .	84
6.2.2.	Limpieza general . . . . .	84
6.3.	Guía de operación . . . . .	85
6.3.1.	Puesta en marcha del separador . . . . .	85
6.3.2.	Operación manual del separador . . . . .	86
6.3.3.	Operación automática del separador . . . . .	86
6.4.	Operación de calentadores de inmersión . . . . .	86
<b>7.</b>	<b>Costos relacionados</b>	<b>88</b>
<b>8.</b>	<b>Conclusiones</b>	<b>91</b>
<b>9.</b>	<b>Recomendaciones</b>	<b>93</b>

<b>Bibliografía</b>	<b>96</b>
<b>Anexos</b>	<b>98</b>
Anexo A.1. Cronograma . . . . .	98
Anexo A.2. Visita de Campo a C.P San Antonio . . . . .	99
Anexo A.3. Visita de Campo a C.P Garabito . . . . .	102
Anexo A.4. Sistemas de calefacción eléctrica . . . . .	107
Anexo A.5. Aislamiento térmico . . . . .	109
Anexo A.6. Bombas para recolección de lodos de fondo . . . . .	110
Anexo A.7. Bombas para recolección de aceite-hidrocarburos . . . . .	113
Anexo A.8. Perfil de vigas ASTM A-36 para soportes estructurales . . . . .	116
Anexo A.9. Mantenimiento y operación . . . . .	117
Anexo A.10. Dibujos y planos esquemáticos . . . . .	119
Anexo A.11. Memoria de cálculo . . . . .	127

# Índice de figuras

2.1. Diagrama del proceso de formación de lluvia ácida . . . . .	7
2.2. Diagrama del proceso de tratamiento de aguas residuales . . . . .	11
2.3. Diagrama del proceso de tratamiento de aguas residuales con Post-tratamiento . . . . .	13
2.4. Funcionamiento básico de separador . . . . .	16
2.5. Funcionamiento básico de separador . . . . .	16
2.6. Diagrama de ascenso de partículas de aceite e hidrocarburos . . . . .	18
2.7. Separador API Canal Rectangular . . . . .	19
2.8. Separador CPI Acanalado de placas . . . . .	21
2.9. Materiales según norma API 650 para un tanque metálico . . . . .	28
2.10. Valores de alfa para cálculos en tanques rectangulares . . . . .	29
2.11. Jets o deflectores cóncavos . . . . .	31
2.12. Baffles con celosías . . . . .	31
2.13. Tubos sifón . . . . .	32
2.14. Esquema lodos en fondo del tanque . . . . .	33
3.1. Diseño del separador agua-hidrocarburos . . . . .	34
3.2. Vista superior del separador . . . . .	39
3.3. Vista lateral derecha del separador . . . . .	40
3.4. Vista lateral izquierda del separador . . . . .	40
3.5. Vista frontal del separador . . . . .	40
3.6. Dibujo de cuerpo principal del separador . . . . .	42
3.7. Configuración y orientación de placas paralelas . . . . .	43
3.8. Baffles con celosías . . . . .	46
3.9. Dimensiones de recolectores de aceite-hidrocarburos, cotas en <i>mm</i> . . . . .	47
3.10. Dibujo de recolectores de aceite-hidrocarburos . . . . .	48
3.11. Jet ó deflector cóncavo a la entrada del separador . . . . .	50
4.1. Resistencias eléctricas . . . . .	52
4.2. Atornillados calefactor de inmersión eléctrica . . . . .	53
4.3. Aislamiento térmico en la pared de un tanque metálico . . . . .	55
4.4. Aislamiento térmico ALUBLOCK . . . . .	56
4.5. Aislamiento térmico ALUBLOCK tipo panel . . . . .	56
4.6. Válvulas de entrada y salida del separador . . . . .	59
4.7. Válvula de purga de lodos en fondo del separador . . . . .	59
4.8. Bomba para recolección de lodos . . . . .	60
4.9. Motor de bomba para recolección de lodos . . . . .	60
4.10. Detector ultrasonido de nivel de agua . . . . .	63
4.11. Detector de nivel de agua SIEMENS The Probe . . . . .	64
4.12. Dimensiones detector de nivel de agua SIEMENS The Probe . . . . .	64
4.13. Sensor ACO SECURAT 2001 . . . . .	65
4.14. Panel sensor ACO SECURAT 2001 . . . . .	66

4.15. Diagrama sensor ACO SECURAT 2001 . . . . .	67
5.1. Láminas Acero ASTM A36 . . . . .	69
5.2. Pintura Hempel HEMPADUR 15400 para interior y exterior del separador . . . . .	71
5.3. Deformación del separador debido a esfuerzos . . . . .	73
5.4. Esfuerzos de Von Mises en la estructura del separador . . . . .	73
5.5. Esfuerzos de Von Mises en la estructura del separador . . . . .	74
5.6. Vigas de soporte estructural para separador . . . . .	74
5.7. Separación entre vigas de soporte estructural . . . . .	75
5.8. Distribución de vigas de soporte estructural para separador . . . . .	76
5.9. Dibujo esquemático de vigas de soporte estructural para separador . . . . .	76
5.10. Tipos de soldadura para paredes y fondo del separador . . . . .	77
5.11. Tipos de soldadura para pared-fondo . . . . .	78
5.12. Tipos de soldadura vertical para pared . . . . .	79
5.13. Tipos de soldadura horizontal para pared . . . . .	80
5.14. Tipos de soldadura para fondo . . . . .	81
6.1. Malacate eléctrico tipo Pluma . . . . .	83
6.2. Malacate eléctrico tipo Polipasto . . . . .	83
9.1. Cronograma de actividades . . . . .	98
9.2. Vista de plano C.P San Antonio . . . . .	99
9.3. Separador C.P San Antonio . . . . .	100
9.4. Diques . . . . .	100
9.5. Piletas de lavado . . . . .	101
9.6. Bombas centrífugas de purificación . . . . .	101
9.7. Bombas Skid . . . . .	101
9.8. Vista de plano C.P Garabito . . . . .	102
9.9. Casa de máquinas con motores de combustión interna reciprocantes . . . . .	103
9.10. Bombas centrífugas de purificación . . . . .	103
9.11. Pits ubicados a lo largo del C.P Garabito . . . . .	104
9.12. Tanque de almacenamiento de aguas residuales-lodos . . . . .	104
9.13. Separador C.P Garabito grande . . . . .	104
9.14. Separador C.P Garabito pequeño . . . . .	105
9.15. Tanque de almacenamiento de aguas residuales pre-tratadas . . . . .	105
9.16. Agua tratada y lista para restituir al río . . . . .	106
9.17. Nomograma para elección de calefactor de inmersión eléctrica . . . . .	107
9.18. Especificaciones calefactor de inmersión eléctrica . . . . .	108
9.19. Especificaciones aislamiento térmico ALUBLOCK . . . . .	109
9.20. Especificaciones de catálogo bomba elegida Vican Heavy Duty Pumps . . . . .	110
9.21. Especificaciones de catálogo motor bomba elegida Vican Heavy Duty Pumps . . . . .	111
9.22. Curvas de operación bomba lodos con motor . . . . .	111
9.23. Curvas de operación bomba lodos con motor . . . . .	112
9.24. Especificaciones de catálogo bomba elegida Goulds Pumps . . . . .	113
9.25. Especificaciones de catálogo bomba elegida Goulds Pumps . . . . .	113
9.26. Especificaciones operativa de catálogo bomba elegida Goulds Pumps . . . . .	114
9.27. Curvas de operación bomba aceite-hidrocarburos con motor . . . . .	114
9.28. Curvas de operación bomba aceite-hidrocarburos con motor . . . . .	115
9.29. Perfil de vigas ASTM A-36 para soportes estructurales . . . . .	116
9.30. Especificaciones elevador eléctrico tipo Pluma . . . . .	117
9.31. Especificaciones elevador eléctrico tipo Polipasto . . . . .	118
9.32. Isométrico con direcciones de flujo del separador. . . . .	119
9.33. Isométrico final del separador . . . . .	120

9.34. Plano esquemático de isométrico final del separador . . . . .	121
9.35. Plano esquemático de explosión de isométrico del separador . . . . .	122
9.36. Plano esquemático del cuerpo del separador . . . . .	123
9.37. Plano esquemático de baffles del separador . . . . .	124
9.38. Plano esquemático de jets del separador . . . . .	125
9.39. Plano esquemático de tuberías sifón del separador . . . . .	126
9.40. Tabla propiedades agua para cálculos de diseño de separador . . . . .	127
9.41. Simbología memoria iterativa . . . . .	127
9.42. Memoria iterativa en MS Excel para análisis de dimensiones generales en unidades SI . .	128
9.43. Memoria iterativa en MS Excel para análisis de dimensiones generales en unidades SI . .	129
9.44. Memoria iterativa en MS Excel para análisis de dimensiones generales en unidades SI . .	130
9.45. Memoria iterativa en MS Excel para cálculos de dimensiones según ecuaciones en unidades SI . . . . .	131
9.46. Memoria iterativa en MS Excel para cálculos de placas paralelas en unidades SI . . . . .	132
9.47. Memoria iterativa en MS Excel para cálculos de tuberías en unidades SI . . . . .	133
9.48. Memoria iterativa en MS Excel para cálculos de tuberías en unidades SI . . . . .	133
9.49. Memoria electrónica en MS Excel para cálculos de costos relacionados . . . . .	134
9.50. Memoria electrónica en MS Excel para cálculos de costos relacionados . . . . .	134
9.51. Memoria electrónica en MS Excel para cálculos de costos relacionados . . . . .	134

# Índice de cuadros

3.1. Valores de parámetros de entrada al separador . . . . .	35
3.2. Tabla resumen de dimensiones del separador . . . . .	39
3.3. Rangos típicos para el diseño de placas paralelas . . . . .	44
3.4. Medidas finales de placas paralelas . . . . .	45
3.5. Dimensiones de recolectores de aceite-hidrocarburos en canales del separador . . . . .	47
4.1. Especificaciones constructivas de bomba para extracción de lodos . . . . .	61
4.2. Especificaciones operativas de bomba para extracción de lodos . . . . .	61
4.3. Especificaciones constructivas de bomba para extracción de hidrocarburos . . . . .	62
4.4. Especificaciones motor de bomba para extracción de hidrocarburos . . . . .	62
4.5. Especificaciones operativas de bomba para extracción de hidrocarburos . . . . .	62
4.6. Especificaciones detector ultrasonido de nivel de agua . . . . .	64
4.7. Especificaciones sensor ACO SECURAT 2001 . . . . .	67
5.1. Datos técnicos del recubrimiento elegido . . . . .	71
5.2. Detalles de aplicación del recubrimiento . . . . .	71
7.1. Costos relacionados de bombas de recolección . . . . .	88
7.2. Costos relacionados de detectores de nivel . . . . .	88
7.3. Costos relacionados de tuberías, válvulas y accesorios . . . . .	89
7.4. Costos relacionados de materiales de fabricación y recubrimiento . . . . .	89
7.5. Costos relacionados de elevadores, aislamiento térmicos, resistencias . . . . .	89
7.6. Costos relacionados totales del separador . . . . .	89

## Simbología

- $g$  Aceleración de la gravedad, en  $m/s^2$  ó  $pie/s^2$   
 $r_o$  radio del globulo de aceite, en  $m$  ó  $pies$   
 $\rho_w$  es la densidad del agua, en  $kg/m^3$ ,  
 $\rho_o$  es la densidad del aceite, en  $kg/m^3$   
 $\mu_w$  Viscosidad dinámica del agua  
 $\nu_w$  Viscosidad cinemática del agua  
 $A_c$  es el área transversal, en  $m^2$  ó  $pie^2$   
 $Q_e$  es el caudal, en  $pie^3/min$   
 $V_h$  Velocidad horizontal  $pie/min$   
 $d$  Profundidad del canal, en  $m$  ó  $pies$   
 $A_c$  Área vertical de sección transversal mínima, en  $m^2$  ó  $pie^2$   
 $W_c$  Ancho del canal, en  $m$  ó  $pies$   
 $n$  Número de canales (adimensional)  
 $L$  Largo del canal, en  $m$  ó  $pies$   
 $F_{cc}$  Factor de cortocircuito (adimensional)  
 $F_T$  Factor de turbulencia (adimensional)  
 $V_{as}$  velocidad ascensional vertical del glóbulo de aceite de diseño, en  $m/s$  ó  $pie/min$   
 $V_{cs}$  Velocidad crítica de sedimentación, en  $m/s$  ó  $pie/min$   
 $L_p$  Largo de placas paralelas, en  $m$  ó  $pies$   
 $W_p$  Ancho de placas paralelas, en  $m$  ó  $pies$   
 $t_p$  Espesor de placas paralelas, en  $m$  ó  $pies$   
 $\theta_p$  Inclinación de placas paralelas, en  $^\circ$   
 $s_p$  Separación entre placas paralelas,  $m$  ó  $pies$

## Abreviaturas

**ICE** Instituto Costarricense de Electricidad

**API** American Petroleum Institute

**ASME** American Society of Mechanical Engineers

**ASTM** American Society of Testing Materials

**ANSI** American Standard Institute

**IEEE** Institute of Electrical and Electronic Engineers

**MINAE** Ministerio de Ambiente y Energía

**CPI** Corrugated Plate Interceptor (Acanalado de Placas Corrugadas)

**PPI** Parallel Plate Interceptor (Placas Paralelas)

**DAF** Flotación por Aire Disuelto (Dissolved Air Flotation)

**DBO** Demanda Biológica de Oxígeno

**DQO** Demanda Química de Oxígeno

**pH** Potencial de Hidrógeno

**C.P** Centro de Producción

## Resumen

Las centrales de generación eléctrica tienen como parte de su operación la necesidad de eliminar sus desechos contaminantes de la mejor manera posible sin alterar las condiciones del medio ambiente que las rodea, así como las condiciones de proceso y operación de las mismas. En este trabajo final de graduación se propone el diseño mecánico normalizado para separadores de mezcla agua-hidrocarburos que se utilizarán en distintas centrales de generación eléctrica pertenecientes al ICE.

Para dicho diseño, se contempló en el dimensionado paramétrico del separador las variables principales como los caudales de entrada de la mezcla agua-hidrocarburos, las concentraciones y densidades de las grasas y aceites existentes en la central de generación eléctrica. A partir de esta información se calcularon todas las dimensiones y características optimizadas del diseño.

El dimensionamiento del separador de agua-hidrocarburos se basó en diferentes normativas de ingeniería, también se evaluaron distintas mejoras para aplicar al diseño final que de igual manera puedan cumplir con la necesidad de las centrales de generación eléctrica.

En el diseño del separador agua-hidrocarburos, se contempló la adecuada selección de los sistemas auxiliares como instrumentación, bombas para recolección de la mezcla agua-hidrocarburos, bombas para recolección de lodos de fondo, tuberías y otros accesorios, para que estos optimicen el separador en cuestión y así obtener la mejor eficiencia y facilitar la gestión de la operación y el mantenimiento. Además, se buscó una reducción en los costos asociados utilizando los materiales adecuados para el proceso, facilidades del diseño para lograr un mejoramiento de la eficiencia y un mayor grado de automatización operativa.

# Capítulo 1

## Introducción

Los hidrocarburos son un contaminante muy frecuente en las aguas residuales de cualquier central de generación eléctrica, por lo que se han desarrollado técnicas y procesos específicos para su eliminación. Cada proceso debe cumplir con los estándares de una legislación actual que pregona que dichas aguas residuales a su salida, no sean perjudiciales para el ambiente por lo que en este proyecto se establecerán las pautas principales a considerar para un diseño adecuado de un separador modular agua-hidrocarburos y demás detalles que describan el adecuado proceso de separación.

### 1.1. Descripción general

Se requiere realizar de manera estandarizada un diseño modular de un separador de aguas e hidrocarburos que sea eficiente, barato y que permita eventualmente una fácil construcción (si lo solicita el ICE), evitando al máximo cualquier sistema móvil (motorizado de limpieza).

Las dimensiones del separador y de sus elementos, estarán de acuerdo a los parámetros de caudales de agua de ingreso y sus respectivas concentraciones de hidrocarburos al inicio del proceso; el agua debidamente separada que se verterá al cauce del río deberá cumplir con la normativa requerida por la legislación costarricense.

El diseño estandarizado, permitirá el dimensionamiento general de todos los componentes mecánicos del separador de agua-hidrocarburos que se utilizará en las centrales de generación eléctrica. A manera de ejemplo y para el desarrollo del diseño y dimensionamiento de un separador, se escogerá el caudal y características del agua de una planta de generación termoeléctrica, que opere regularmente en alguna época del año.

Las centrales térmicas brindan la condición más crítica de contaminación de las aguas con hidrocarburos. Con la selección de esta central térmica, se podrá calcular toda la secuencia del diseño y dimensionamiento del separador, utilizando los respectivos cálculos matemáticos y algunos parámetros básicos del agua a separar.

### 1.2. Objetivos

#### 1.2.1. Objetivo general

- Elaborar un diseño normalizado y parametrizado de separadores de tipo modular de agua-hidrocarburos para centrales de generación eléctrica.

### 1.2.2. Objetivos específicos

- Caracterizar los tipos más importantes de separadores agua-hidrocarburos (aceite), que se utilizan en industrias donde se manejan hidrocarburos.
- Definir un ámbito de parámetros operativos de caudal, concentración de grasas y aceites esperados, gravedad específica del aceite-hidrocarburo, en las centrales de generación eléctrica para utilizar como referencia en el diseño.
- Proponer una configuración general de separador que permita una construcción modular y escalamiento de sus dimensiones según las variantes de caudal y concentración de aceites y grasas.
- Preparar un sistema de cálculo normalizado para el dimensionado del separador según parámetros de entrada y de acuerdo a las necesidades del proceso.
- Seleccionar en función de las variables de entrada dinámicas los componentes principales y periféricos para el adecuado dimensionamiento del tanque del separador.
- Elaborar una guía de trabajo que incluya hojas de cálculo, diagramas de construcción y listas de materiales para la futura construcción de separadores específicos.
- Confeccionar un plan de operación y mantenimiento general del separador, para proveer a los operadores una guía general.

### 1.3. Justificación

El Instituto Costarricense de Electricidad (ICE) cuenta con distintos tipos de separadores operan en las centrales existentes, pero igualmente con frecuencia se están construyendo nuevas centrales de generación eléctrica que requieren de nuevos separadores con distintos requerimientos. Existe interés en normalizar el tipo de separador que se podrá utilizar en centrales eléctricas, especialmente las que se encuentran en proceso de desarrollo.

Cada planta requerirá de un diseño de separador a la medida dependiendo de sus parámetros de operación, este tipo de diseños son costosos, principalmente por el tiempo, más aún si se considera la curva de aprendizaje de un diseñador sin experiencia. Adicionalmente se debe asegurar que estos diseños cumplan con la normativa pertinente. Surge entonces la necesidad de normalizar este proceso. Se estableció que el separador debe ser diseñado de acuerdo con la normativa API (American Petroleum Institute).

Los separadores necesitan un diseño a la medida, pero esto es costoso en tiempo, en especial si el diseñador no tiene experiencia previa (curva de aprendizaje del diseñador), y no se garantiza diseño con todas las normas pertinentes.

Una propuesta de diseño modular implica una facilidad constructiva ya que se reducirá considerablemente el costo de los componentes. El diseño y selección de estos debe responder siempre a los parámetros de operación de la planta.

Al establecer un diseño normalizado con miembros modulares se atienden los inconvenientes de tiempo y costo, ya que el diseñador solo recurrirá al diseño modular normalizado. Este trabajo responde a estas necesidades.

## 1.4. Antecedentes

La legislación costarricense obliga a las industrias a disponer de las aguas del proceso que se verterán a los cauces de los ríos, con ciertas características de calidad, mismas que no afectarán la biótica del entorno y la calidad de los ríos. La ley número 33601 referente al *Reglamento de Vertido y Reuso de Aguas Residuales*, menciona que las concentraciones de grasas y aceites contenidas en las aguas industriales de desecho que se disponen a los cauces, deben cumplir con parámetros obligatorios de concentración máxima permitida, en los aceites emulsificados o en suspensión que se vierten.

En las centrales de generación eléctrica, indistintamente que la misma sea de la tecnología hidráulica, termoeléctrica o geo termoeléctrica, la contaminación de las aguas con grasas y aceites es influenciada de alguna manera por la gestión normal operativa y la gestión del mantenimiento de las mismas. En los talleres de mantenimiento se utilizan hidrocarburos (canfín, aguarrás, etc.) para la limpieza de piezas u otros elementos en las piletas de lavado; en algunas de ellas existen fugas por goteo y evaporación en los alrededores de los cojinetes o chumaceras de las turbinas y motores.

Aunado a esto, en las centrales de generación hay tanques de combustible con sus respectivos diques anti derrame, en los cuáles de alguna manera las aguas llovidas depositadas se contaminan con combustibles. Estos tanques reciben el combustible mediante camiones cisterna, pero en el proceso de descarga pueden ocurrir fugas de combustible que se mezclan con las aguas llovidas. En los patios de descarga de combustible, en las casetas de bombeo, en los cuartos de las centrífugas de purificación de combustible, también se generan aguas contaminadas. Las bodegas de almacenamiento con recipientes que contengan algún hidrocarburo, también puede ocasionar fugas. Todas estas aguas contaminadas usualmente se conducen mediante tuberías a tanques de captación y a separadores de agua-hidrocarburos para su tratamiento.

Por lo anterior se convierte en una necesidad el tratamiento de las aguas residuales de vertido. El separador ayuda a evitar que estas aguas contaminadas sean vertidas en cuerpos de agua. Para esto, se utilizan métodos mecánicos de separación principalmente dependientes de la diferencia de densidades, de tal forma que se logra remover la mayoría de los hidrocarburos presentes en el agua y como resultado se obtiene una concentración aceptable que cumple con las leyes y normas establecidas.

## 1.5. Metodología

### 1. *Investigación de campo e identificación de necesidades:*

- Se coordinó con los personeros del ICE para identificar las necesidades de la institución y se establecieron las características principales de diseño del separador agua-aceite. Con esto se determinaron los alcances y las limitaciones de dichas necesidades y el planteamiento de los objetivos de trabajo, así como el cronograma de trabajo.

### 2. *Investigación bibliográfica:*

- Se realizó una búsqueda y selección bibliográfica que abarcó la importancia de aguas industriales y la legislación costarricense en cuanto a aguas residuales.
- Se indagó en documentación teórica el funcionamiento básico, los tipos de separadores, materiales adecuados para su fabricación y otros elementos importantes.
- Se estudió a profundidad las distintas normativas de diseño internacionales correspondientes a los separadores de agua-hidrocarburos.
- Se realizaron visitas de campo junto con el asesor externo a las diferentes centrales de generación eléctrica para tener conocimiento de causa. También se recabaron los datos de referencia que serán utilizados como muestra para el diseño del separador.

### 3. Definición de los parámetros de diseño:

- En conjunto con el asesor externo, se seleccionó el tipo de separador que muestre ventajas y facilidades desde la perspectiva de diseño, construcción, costo, materiales, entre otros.
- Con base en toda la información obtenida, se dimensionaron los elementos del separador tales como las mamparas internas, tuberías de ingreso y salida, volumen de la estructura, tubería de desagüe, entre otros.
- Se evaluó la posibilidad de modificar los diseños convencionales para mejorar la eficiencia de funcionamiento.
- Se diseñó y seleccionó en función de las variables de entrada dinámicas de los componentes periféricos del separador como sistemas de calefacción de la mezcla, aislamiento térmico, las válvulas y bombas para la recolección de lodos de fondo y aceite recolectado, y el sistema de detección de nivel que accione la bomba de trasiego, entre otros.

### 4. *Diseño final:*

- Se seleccionaron sus accesorios como sistemas de calefacción de la mezcla, aislamiento térmico, las válvulas, bombas para la recolección de lodos de fondo y aceite recolectado, y el sistema de detección de nivel que accione la bomba para drenaje de lodos, entre otros.
- Se elaboraron los cálculos de esfuerzos sobre el piso y paredes del separador, producto del agua contenida dentro del mismo.
- Se seleccionaron los materiales de construcción basándose en diversos criterios como resistencia química, resistencia mecánica, apariencia, acabado superficial, facilidad constructiva, disponibilidad, funcionalidad y precio.
- Se elaboraron planos esquemáticos de las partes del separador a diseñar.
- Se confeccionó un protocolo de mantenimiento y operación general del separador.
- Con base en la normativa revisada, y con la experiencia adquirida en los separadores se desarrolló un modelo general en MS Excel para el diseño parametrizado de un separador de agua-hidrocarburos.

### 5. *Presupuesto y costos:*

- Se efectuó una valoración, considerando los costos de referencia del separador, los materiales, instalación de los sistemas complementarios, accesorios, tuberías, y bombas de recolección.

## 1.6. Alcances

Para este proyecto de graduación, se tomó en cuenta la legislación costarricense; que exige que el vertido de las aguas de los procesos industriales cumplan con los parámetros establecidos en cuanto a las concentraciones de grasas y aceites que se vierten al cauce de los ríos. Además, se obliga a normalizar y parametrizar el diseño de un separador agua-hidrocarburos, fundamentado en la normativa API para centrales de generación eléctrica. Se tomó como referencia los parámetros de la central de generación termoeléctrica C.P Garabito para la realización del diseño final.

Los procesos industriales, en donde existen equipos y maquinaria que requiere de aceites y grasas para lubricación y combustible, además de otros hidrocarburos que se utilizan en los procesos de mantenimiento; estos se convierten por las fugas y vertidos típicos de la gestión estos se convierten en focos de contaminación los cuales, mezclados con las aguas que se utilizan en la operación, el mantenimiento, las lluvias y escorrentía; generan mezclas emulsificadas de agua y aceite. Estas se deben procesar para lograr su separación y disposición. El diseño no contemplará otro tipo de contaminación y si se deseará migrar a este uso, se debe realizar una revisión cuidadosa de los requerimientos y parámetros de operación.

A partir de los volúmenes de agua contaminada, y de los caudales que se deben procesar en el separador de agua-hidrocarburos, como parámetros de referencia para el diseño a desarrollar; se establecerán las especificaciones mecánicas necesarias para el dimensionamiento adecuado, y la caracterización de las diferentes partes que componen el separador.

El diseño de separador propuesto acordado con la empresa, no deberá contener mecanismos de eliminación de natas o bandas transportadoras accionadas con motor, únicamente funcionara por gravedad y la separación del aceite y el agua en función del tiempo de proceso y capacidad de separación.

La selección de materiales y sus características, la configuración de los componentes, la disposición de los elementos son aspectos fundamentales en el diseño. Los aspectos de operación exigirán un nivel de automatización básica para el correcto funcionamiento del separador; permitiendo esto que el mantenimiento se ejecute de una manera más sencilla.

Para este proyecto, que solo consiste en el diseño del separador, no contará con la realización de pruebas del funcionamiento del mismo, debido a que no se construirá en esta presente etapa. Además cabe destacar que no se proveerán planos detallados, ni documentos de especificaciones, únicamente diagramas esquemáticos de construcción y listas de materiales generales. En lo que respecta a los costos, solamente se calculará una estimación para ayudar en la toma de decisiones, y no contiene una cotización formal.

Se aclara que este diseño es únicamente para esta aplicación de separación de agua-hidrocarburos y dicho diseño no se puede migrar a otro tipo (como aguas negras o industriales en general, soluciones químicas de desecho, entre otras), sin una revisión cuidadosa de requerimientos y fronteras de trabajo. Por último, se enfatiza en el hecho que cualquier usuario que quisiera hacer uso del diseño del separador para llevarlo a la práctica, deberá contar con el respectivo permiso escrito de los autores.

# Capítulo 2

## Marco teórico

En los procesos industriales, como la generación de energía eléctrica en centrales de producción, se hace indispensable la identificación de los aspectos ambientales directos e indirectos de las actividades, productos y servicios llevados a cabo en dichas centrales y que puedan afectar al entorno en que operan, incluyendo elementos tales como: el aire, el agua, la tierra, los recursos naturales, la flora, la fauna, los seres humanos y sus relaciones, es decir, el entorno en que se desarrolla en este contexto se extiende desde el interior del recinto industrial al sistema global. Una gestión apropiada del tratamiento de aguas residuales y procesos para disminuir la contaminación de estos procesos industriales producirá efectos deseables.

### 2.1. Características de las aguas residuales

#### 2.1.1. Vías de contaminación del agua

El agua es el elemento básico para la vida, por lo tanto, factores como la contaminación del agua ponen en peligro el mantenimiento de la vida en el planeta. El Diccionario de la Energía (2009), define la contaminación del agua como el término general que se refiere a la descarga de sustancias peligrosas o indeseables al océano, lagos, ríos, y otros cuerpos de agua, de fuentes como viviendas, agricultura, desechos de fábricas, plantas de tratamiento de aguas vertidas, y similares. Esto también incluye contaminantes indirectos que entran a las fuentes del agua desde el suelo y la atmósfera [21].

Existen varias vías mediante las cuales se pueden contaminar el agua:

- *Contaminación atmosférica*: se refiere a la producida por los gases y partículas en suspensión presentes en la atmósfera. El agua disuelve estos componentes o los arrastra al llover. A este fenómeno de arrastre se le conoce como lluvia ácida.

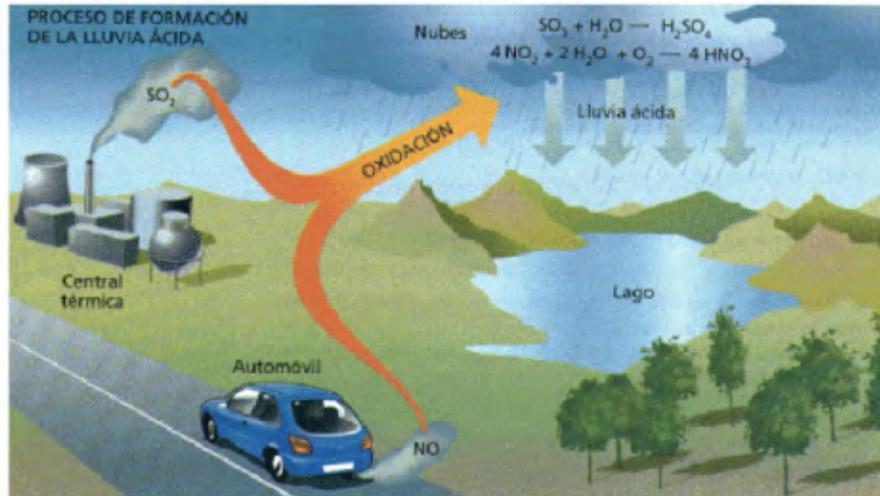


Figura 2.1: Diagrama del proceso de formación de lluvia ácida. Fuente: El Blog Verde (2015) [10]

- *Contaminación agrícola y ganadera*: es aquella producida por restos de abonos, agroquímicos, y materia orgánica proveniente del ganado y la explotación ganadera. Afecta las aguas superficiales y las subterráneas.
- *Contaminación doméstica*: abarca la producida por las actividades domésticas como limpieza, lavandería, preparación de alimentos, riego, residuos fisiológicos, etc. Todos estos focos están directamente relacionados con la utilización de agua, la cual normalmente es vertida al sistema de alcantarillado y posteriormente a plantas de tratamiento.
- *Contaminación industrial*: las industrias son las principales consumidoras de agua y las principales contaminadoras. Esta es utilizada en todo tipo de procesos. Luego de ser contaminada suele ser vertida ya sea al alcantarillado o directamente a los cuerpos de agua. Es responsabilidad de los gobiernos regular este tipo de actividades. Entre las industrias más contaminantes se encuentra la química, petrolera, textil y alimentación. Para el caso del presente trabajo esta es la más pertinente.

### 2.1.2. Parámetros generales para medir la contaminación del agua

Existen muchas maneras para medir los niveles de contaminación en el agua, dependiendo del uso que se le vaya a dar a la misma, sea potabilización, vertido, riego, etc. A continuación los parámetros más universales que se utilizan para determinar la contaminación, especialmente en el vertido de aguas.

- *Demanda Química de Oxígeno (DQO)*: se define como la cantidad de oxígeno utilizado mientras se oxida la materia orgánica en una muestra con un oxidante químico bajo condiciones ácidas. Usualmente se utiliza para medir la fuerza de contaminación de residuos domésticos e industriales. Esta prueba es particularmente útil para determinar la presencia de condiciones tóxicas y de sustancias orgánicas bioresistentes. [27]
- *Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBQ)*: se define como la cantidad de oxígeno que requieren las bacterias mientras estabilizan la materia orgánica bajo condiciones aeróbicas. Con esta prueba básicamente se determinan los requerimientos de oxígeno de cuerpos de agua, agua contaminada o agua vertida. La DBQ da una idea de la capacidad de purificación de los efluentes y es utilizado por las entidades reguladoras para medir la calidad de las aguas vertidas. [27]
- *Potencial de Hidrógeno (pH)*: el pH es una medición del equilibrio ácido-base en una sustancia. En el agua tiene un efecto sobre la tasa de crecimiento microbiano. Por lo general un pH entre 6.5 y 8.5 se considera aceptable para sostener la vida. [27]

- *Grasas y aceites*: como el nombre lo dice se refiere a la concentración de grasas y aceites en el agua, determinados por medio de un método de disolución. Este parámetro se utiliza para determinar la eficiencia de plantas de tratamiento. Entre las fuentes de estos compuestos están los hidrocarburos, aceites, jabones, ceras y lípidos. [27]
- *Sólidos*: es un parámetro que se divide en *sólidos disueltos*, *sólidos sedimentables*, *sólidos suspendidos* y *sólidos totales*. Controlar este parámetro es importante, pues por un lado, pueden funcionar como sitios de absorción para agentes biológicos y químicos; estos sitios proveen una barrera protectora de microorganismos en contra de la acción de desinfectantes de cloro. Por otro lado, estos sólidos pueden biodegradarse, resultando en productos indeseables. Comúnmente estos se tratan utilizando filtración. [32]
- *Temperatura*: es importante controlar la temperatura del agua, pues debido a su alto calor específico, el agua tiene mucha capacidad para absorber o liberar calor rápidamente. Un incremento o disminución en la temperatura del agua tiene varios efectos. Por otra parte, afecta el equilibrio bajo el cual viven algunas especies, las cuales no soportarían cambios importantes en las temperaturas. Asimismo, la temperatura afecta la solubilidad del oxígeno en el agua, la tasa de actividad bacteriana y la tasa de transferencia de gases hacia y desde el agua. El cambio de temperatura también tiene efectos sobre los sistemas de tratamiento de aguas. [32]
- *Otros parámetros*: existen aún más parámetros que se utilizan para determinar la calidad del agua dependiendo del interés de la aplicación de la misma. Entre ellos: color, dureza, alcalinidad, niveles de calcio, magnesio, fenoles, fosfatos, sílica, sodio, cobre, plomo, manganeso, cromo, etc.

### 2.1.3. Contaminación ambiental debido a hidrocarburos

Los hidrocarburos se pueden presentar en el ambiente de diversas maneras: en fase libre, fase disuelta, fase en emulsión, o en fase vapor. Los separadores como el del presente proyecto se encargan de dar tratamiento a los hidrocarburos en fase libre, es decir, como viene el producto originalmente.

Por lo general, las plantas termoeléctricas funcionan con productos de media destilación como el diesel o productos de alto punto de ebullición como el bunker. Asociadas a estos hidrocarburos hay varias sustancias altamente contaminantes como: parafinas, cicloparafinas, aromáticos polinucleicos y parafinas de cadenas largas asociadas con aceites lubricantes. [31]

Una vez liberados al ambiente, los hidrocarburos sufren varios procesos de degradación debido a las fuerzas de la naturaleza. Estos procesos determinarán en parte los efectos que tenga el producto sobre el ambiente. Según Speight, J. (2011) estos procesos son: [31]

- *Dispersión*: se refiere al transporte físico de gotas de crudo en una columna de agua. Esto puede deberse a la turbulencia del agua o a productos químicos. Los hidrocarburos dispersados se biodegradan más rápido.
- *Disolución*: es la pérdida de componentes individuales del hidrocarburo en el agua. Muchos de los componentes más tóxicos como el benceno, tolueno y xileno (BTEX), que son los aromáticos, son también los más solubles en agua.
- *Emulsificación*: algunos hidrocarburos forman emulsiones de agua en aceite. Esto es particularmente dañino pues aumenta el volumen aparente de aceite, y la emulsificación retarda los otros procesos como la evaporación y la disolución.
- *Evaporación*: los hidrocarburos son altamente volátiles, por lo que este es el proceso de transporte más importante. La evaporación depende fuertemente de la composición del hidrocarburo.
- *Infiltración*: este proceso transforma el hidrocarburo a la fase acuosa. El hidrocarburo pasa a infiltrarse en los suelos, teniendo consecuencias desastrosas.

- *Sedimentación*: el producto puede ser absorbido por partículas sólidas presentes en el agua y consecuentemente hundirse. En las profundidades estas partículas pueden ser ingeridas por el zooplankton.
- *Propagación*: esta depende de condiciones como la viscosidad, la temperatura ambiente, humedad, etc.

Debido a la complejidad y a la gran variedad de hidrocarburos, es difícil generalizar acerca de la toxicidad de los mismos. En general las rutas de exposición incluyen ingestión, inhalación, contacto dermatológico y bioconcentración a través de la cadena alimenticia.

A grandes rasgos, y para ejemplificar, Speight J. (2011) anota que los alcanos reducen la actividad cerebral y tienen propiedades analgésicas. Se han registrado casos de muerte súbita debido a la inhalación de vapores de hidrocarburos.

Algunos efectos de los BTEX (Benceno, Tolueno, Etilbenceno, Xileno) incluyen alta toxicidad a la vida acuática y riesgo de intoxicación por inhalación. Speight también señala que los BTEX son más asociados a riesgos a la vida humana que al ambiente.

#### 2.1.4. Fuentes de contaminación en las centrales eléctricas

Para el desarrollo de este proyecto se ha investigado que las centrales de generación eléctrica del tipo termoeléctricas, son las que brindan la condición más crítica de contaminación de las aguas con hidrocarburos, por lo tanto se debe considerar elegir una central modelo de este tipo con la cual se tomarán sus parámetros como base para el diseño e investigación.

Como parte de las actividades esquematizadas en el cronograma de trabajo, (Ver figura 9.1 en la página 98) se tuvo como actividades, visitas de campo al C.P San Antonio y C.P Garabito del ICE, en las cuáles contó con la oportunidad de observar las fuentes de contaminación más representativas de dichos centros de producción de energía eléctrica, así como también características y funcionamiento del separador de dichos centros de generación.

Dentro de las fuentes de contaminación más comunes en este tipo de centrales eléctricas se tienen:

- Aguas llovidas que se depositan dentro de los diques de tanques de almacenamiento de combustible. (Ver figura 9.4 en la página 100).
- Piletas de lavado, para piezas mecánicas lavadas con algún hidrocarburo, no se permite detergentes ni jabones ya estos pueden dañar la mezcla a separar. (Ver figura 9.5 en la página 101)
- Patios de recepción de combustible, cisternas descargan en tanques si hay derrames se limpian con vapor a canaletas que dan a un tanque de recolección que a su vez está conectado al separador.
- Como parte del proceso de trasiego del combustible de los tanques a las unidades de generación termoeléctricas, se necesita que el combustible diesel pase por los cuartos de las bombas centrífugas de purificación de combustible, (Ver figura 9.6 en la página 101) para limpiar el hidrocarburo de impurezas que entrará en las turbinas de gas o motores y así facilitar que la combustión sea la más adecuada posible al proceso de generación eléctrica.
- Bombas Skid; se generan residuos o derrames en la sección de bombeo en el skid que estos residuos son dirigidos a canaletas y estas al separador. (Ver figura 9.7 en la página 101).
- Las bodegas de almacenamiento con recipientes, cuartos de lavado de instrumentos que contengan algún hidrocarburo, pueden ocasionar fugas.

Dichas fuentes de contaminación son las más representativas en este tipo de centrales, ya que así lo manifestó el jefe del C.P San Antonio el día de la visita de campo (Lopez, D., Comunicación personal, 16 setiembre 2015).

Todas estas aguas contaminadas usualmente se conducen mediante tuberías a tanques de captación y a separadores de agua-aceite para su tratamiento, por lo que es importante llevar un plan de mantenimiento para evitar que el separador disminuya su eficiencia de operación y así continúe trabajando en la separación de la mezcla bajo los límites permitidos por el *Reglamento de Vertido y Reuso de Aguas Residuales N° 33601*; así lo manifestó (Lopez, D., Comunicación personal, 16 setiembre 2015). El plano del C.P San Antonio ejemplifica la distribución de la central eléctrica pero también muestra las fuentes de contaminación ya mencionadas. Ver la figura 9.2 en la página 99.

Por otra parte, como se mencionó anteriormente, se realizó además una visita al C.P Garabito, en donde se conoció el sistema de tratamiento de aguas residuales que opera en dicho centro. Dentro de las particularidades de ese sistema, destaca el hecho que las fuentes de contaminación en dicho centro son relativamente las mismas que las documentadas en la visita al C.P San Antonio.

En el C.P Garabito, se utiliza como tecnología de generación eléctrica los motores de combustión interna reciprocantes; por lo que las aguas residuales que forman traen consigo los residuos de bunker de las casas de máquinas donde se ubican dichos motores, así como se muestran en la figura 9.9 en la página 103.

Además, en el proceso de generación eléctrica, el combustible bunker que se almacena en los tanques, es pasado por estaciones de bombas centrífugas al igual que en el C.P San Antonio, tal y como se aprecia en la figura 9.10 en la página 103; dichas estaciones tienen como función remover la escoria, tierra, agua y demás impurezas que trae consigo el bunker en un proceso que dura aproximadamente 7 min; de esta forma lo manifestó el ingeniero químico del C.P Garabito el día de la visita de campo (Vindas, C., Comunicación personal, 13 noviembre 2015).

El C.P Garabito cuenta con un sistema de pre-tratamiento (Separador API, figura 9.13 en la página 104) y post-tratamiento de las aguas residuales. Este tiene un separador API pequeño que sirve para la separación pero a menor escala, ya que puede trabajar simultáneamente con el separador API grande, lo cual permite que el fluido se mantenga caliente a la hora de la separación, ya dada la densidad del bunker se generan intersticios y liberan las partículas de aceite que suben a la superficie y se da el fenómeno de la separación agua-hidrocarburos(aceite). Este separador se aprecia en la figura 9.14 en la página 105.

Otro elemento muy importante en donde se genera una fuente de contaminación, son en los pits o estaciones que se encuentran a lo largo del C.P Garabito, el cual tiene 14 pits (4 pits en casa de máquinas), ellos son los encargados de recoger la suciedad, lodos, y demás impurezas por derrames en talleres o a la hora de hacer limpiezas de equipos como las bombas centrífugas, por lo que estas aguas se desvían a los pits y de ahí al separador que tiene una función de pretratamiento. Estos pits se aprecian en la figura 9.11 en la página 104.

## **2.2. Tratamiento de aguas en centrales de generación eléctrica**

### **2.2.1. Métodos de tratamiento de aguas residuales**

Como se mencionó en la sección anterior existen una gran variedad de fuentes de contaminación en aguas para las centrales térmicas de generación eléctrica visitadas en las diversas giras realizadas. Sin embargo, esto no es exclusivo de las centrales de generación térmica en Costa Rica, sino que es un problema a escala mundial y presenta de una gran magnitud. Ranade (2014), en su libro *Industrial*

*Wastewater Treatment, Recycling, and Reuse* [29], enlista las industrias, a nivel global, que presentan la mayor contribución a la contaminación del agua, y ubica a las plantas térmicas de generación eléctrica en el tercer lugar de dicha lista.

Además presenta la naturaleza de los contaminantes para este tipo de industria, dentro de los que se encuentran: las cenizas volantes, metales pesados, carbón, aceites y sólidos en suspensión. Como se puede observar la escala del problema en el tema de contaminación del agua y su consecuente producción de aguas residuales es de gran dimensión y justifica la toma de medidas que controlen un tratamiento de aguas adecuado.

El tema de tratamiento de aguas residuales en la industria toma gran relevancia cuando se trata con sectores que manejan grandes volúmenes de aguas residuales. Un sistema de tratamiento de aguas residuales tiene como propósito el proveer agua residual con una calidad aceptable para su desecho o reuso. El sistema consiste en una serie de procesos físicos, químicos y biológicos que tienen como objetivo eliminar los contaminantes presentes en el agua.

En las centrales de generación de energía eléctrica, debido a las funciones que se realizan, se tienen fuentes de contaminación como las mencionadas en la sección anterior; dichas fuentes de contaminación convierten al separador de agua-hidrocarburos(aceite) como una unidad de pretratamiento en el proceso adecuado para la limpieza de las aguas residuales; por lo que es importante recalcar que para efectos de este proyecto solo se desarrollará la temática relacionada con la separación mediante diferencia de densidades entre el agua y los hidrocarburos que estén presentes en la mezcla a separar (pretratamiento) y su respectiva descarga a un cuerpo receptor, así como se muestra en la figura 2.2; por lo que otros procesos químicos (post-tratamiento físico-químico) que se realizan luego del separador solamente se señalarán como referencia en esta sección.

Las aguas de estos procesos son una importante fuente de contaminación, y por ello resulta necesario desarrollar una serie de tratamientos sobre las aguas y sobre los lodos producidos para reducir al mínimo los efectos sobre el cauce receptor. Es importante mencionar que el separador de agua-hidrocarburos(aceite), se le conoce como una unidad de pretratamiento de las aguas residuales recolectadas en las centrales de generación eléctrica.



Figura 2.2: Diagrama del proceso de tratamiento de aguas residuales. Fuente: Elaboración propia (2015)

A la hora de seleccionar los procesos de tratamiento de aguas residuales, se deben seguir ciertas consideraciones como propiedades físicas y químicas de los residuos, características propias (inflamabilidad,

corrosividad, reactividad y toxicidad), la concentración de estos contaminantes a tratar, disponibilidad de instalaciones y de tecnologías para tratamiento, regulaciones y normas de seguridad, mantenimiento de equipos de tratamiento y costos asociados.

Según Sainz Sastre (2004) [30], la importancia de un adecuado tratamiento en las aguas residuales mediante la separación, juega un papel de gran notabilidad a la hora de la descarga de dichas aguas de nuevo al cauce de un río (cuerpo receptor) o si es adecuada para su reutilización, por lo que dentro de las metas de un proceso de separación de grasas y aceites, se encuentran:

- Eliminación de la mayor parte de estos contaminantes del agua residual.
- Evitar la posible formación de atmósferas tóxicas o peligrosas, por tratarse en un número importante de casos de hidrocarburos volátiles.
- Disminuir riesgos de incendios por acumulación de compuestos potencialmente combustibles en las superficies.
- Evitar su presencia en los procesos biológicos por la toxicidad de una gran parte de estos compuestos.

En el proceso de separación se generan lodos o sedimentos, que son partículas de hidrocarburo de densidad más alta que el agua. Por su propio peso, estas partículas tienden a irse al fondo del separador y conforme pasa el tiempo se acumulan en él. Las mismas se deben remover con cierta frecuencia, para evitar que la eficiencia del separador disminuya.

La variedad de procesos disponibles para el tratamiento de residuos sólidos puede clasificarse en tres categorías, que solo se mencionarán:

1. *Procesos de transformación química*: como incineración, o la utilización de dichos residuos sólidos o lodos como combustible para la fabricación de cemento.
2. *Procesos biológicos*: tienen como finalidad la degradación de los compuestos orgánicos contaminantes en pequeñas concentraciones, que sean aceptables. Estos procesos convierten los compuestos orgánicos contaminantes en sustancias manejables, como  $CO_2$  y agua.
3. *Procesos de separación de fases o separación de componentes, que se conocen como procesos físicos*: los procesos físicos incluyen técnicas para la separación de fases y/o componentes del residuo, basadas en el asentamiento de las fases por efecto gravitacional y por las diferentes características del residuo.

Los métodos físicos suelen ser clasificados como técnicas de para mejorar el pretratamiento, y favorecen la acción posterior de otra tecnología. Dentro de estos los más empleados son: flotación, sedimentación, filtración y centrifugación

Por otra parte, se tienen otras formas comunes de tratamiento de las aguas residuales, pero corresponden a un post-tratamiento que se puede realizar a las aguas luego que hayan pasado por el separador, pero antes de ser vertidas en un cuerpo receptor, así como se muestra en el diagrama de la figura 2.3, entre ellos están:

1. *Flotación por aire disuelto (DAF)*: la flotación es otro tipo de tratamiento primario que consiste en el proceso de separación de aceites emulsionados y sólidos presentes en el afluente por medio de burbujas de aire que aceleran el ascenso de los mismos. Estas burbujas se adhieren a las partículas en suspensión y producen una disminución de la densidad aparente del conjunto burbuja-partícula

hasta que la misma se vuelve menor que la del agua. La diferencia de densidades origina un impulso ascendente que hace que las partículas se acumulen en la superficie.

2. *Coagulación y floculación*: la coagulación y floculación son dos procesos que propician el acercamiento de las partículas en pequeñas masas llamadas floculos, de manera que su peso específico sea mayor que el del agua y se conviertan en partículas sólidas de mayor tamaño que sedimentan más rápidamente. Estos procesos se utilizan como un paso acoplado a otra tecnología, como es el caso de sistemas DAF, sedimentación, entre otros.
3. *Sedimentación*: este tipo de tratamiento separa los sólidos de la fase acuosa por acción de la gravedad. También permite remover aceite emulsionado.

El no realizar los mantenimientos periódicos ocasionará el mal funcionamiento e ineficiencia del separador por acumulación de lodos en el fondo del tanque y en las celosías de los baffles. Lo anterior puede provocar una contaminación en las aguas residuales que deben estar limpias a su salida. De no utilizar ninguna de las tecnologías anteriores, es usual remover los lodos durante el mantenimiento del separador, ya sea con un sistema de bombeo, o con remoción mecánica con espátula y palas.

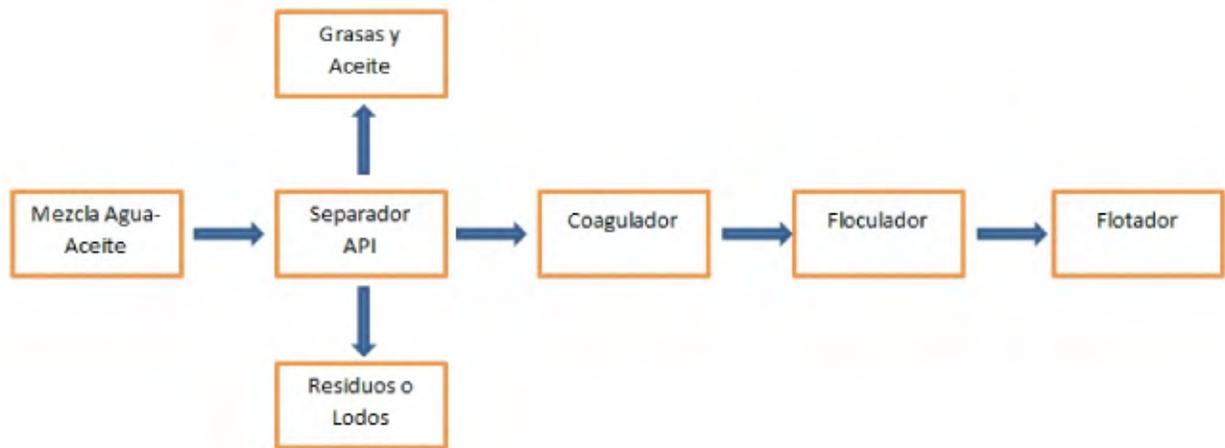


Figura 2.3: Diagrama del proceso de tratamiento de aguas residuales con Post-tratamiento. Fuente: Elaboración propia (2015)

### 2.2.2. Selección del método de tratamiento

Para poder seleccionar el sistema apropiado de tratamiento de aguas se debe medir en primer lugar una serie de parámetros necesarios para cuantificar la contaminación del agua, tales como el DQO, DBO, pH, sólidos y temperatura entre otros (descritos en la sección 2.1.2). Con estas variables se puede seleccionar el sistema de tratamiento necesario para un caso específico además de que se pueden desarrollar medidas de eficiencia para cada sistema aplicado.

Un gran número de procesos de separación han sido establecidos en el área de la ingeniería de tratamiento de aguas residuales. El motivo de ellos es mejorar:

- La pureza o disminuir el nivel de impurezas al remover componentes seleccionados
- La eficiencia energética al utilizar los métodos de separación con la tecnología más apropiada.
- Cumplir con las regulaciones legales y para cuidar el medio ambiente.
- Sostenibilidad de la industria.

Un proceso de tratamiento de las aguas residuales conlleva varias etapas de purificación del agua, estas etapas se pueden clasificar en primario, secundario o terciario. Se basa, en esencia, en la naturaleza del proceso seleccionado de separación y en el resultado del mismo. Como regla general, el tratamiento primario abarca los procesos de separación basados en métodos físicos tales como la sedimentación, filtración, flotación o centrifugación. El tratamiento secundario involucra principalmente métodos físico-químicos como también métodos biológicos y suelen ser capaces de eliminar entre el 85-95 % del DQO/DBO y del total de sólidos suspendidos en las aguas residuales.

El tratamiento terciario contiene el acabado final al remover contaminantes tóxicos y llevarlos a los niveles deseados; se puede llegar a remover más del 99 % al final del tratamiento terciario. Por lo general los tratamientos primarios no son apropiados para el desecho, reciclaje o re-uso de las aguas residuales, su objetivo principal es producir agua con una calidad suficiente tal que pueda ser manejada por un proceso de tratamiento secundario o terciario.

La forma de tratamiento primario es también llamado muchas veces como tratamiento mecánico, porque se realiza con equipos mecánicos construidos en fábricas especializadas, o mediante instalaciones fabricadas en el sitio donde se ubica el proyecto y, hacia donde se canalizan las aguas que se han de limpiar [25].

### **2.2.3. Separación**

La separación de una mezcla es un proceso físico por el cual se obtienen diferentes fases que componen un flujo o corriente de hidrocarburos(aceite) a condiciones iniciales de temperatura y presión. En los procesos industriales, en general, se utilizan dispositivos de almacenamiento de mezclas de agua-hidrocarburos(aceite) que son recolectadas, y llevadas a dichos dispositivos llamados separadores.

Dado que un separador se utiliza para separar los componentes de una corriente o flujo combinados, se han establecido diferentes tipos de separación de fases, como la separación bifásica(líquido-aceite) ó (líquido-gas), la separación trifásica y las polifásicas.

La importancia de la separación de mezclas por medio de separadores se extiende más allá de un recipiente de almacenamiento que aísla en dos o más fases una mezcla por diferencia de densidades. A causa de los avances en el área de diseño se han implementado mejoras en estos dispositivos haciéndolos más exitosos y rápidos en los procesos de separación disminuyendo tiempo y dinero.

Una adecuada separación de mezclas permitirá en primera instancia que sus productos, puedan volver a ser reutilizados en un proceso, en segunda instancia si son productos de desecho o de vertido, favorecerá que estos posean el menor grado de contaminación.

La temática de separación que se abordó en este trabajo, tiene su base en la separación bifásica (agua-aceite), puesto que muchas veces se deben cumplir con normativas ambientales en lo que respecta al vertido o reuso de aguas residuales, luego del proceso de separación.

### **2.2.4. Funciones del proceso de separación de aguas residuales**

Según Sainz Sartre (2004) [30], dentro de las funciones que tiene encomendado el proceso de separación de grasas y aceites, se encuentran:

- Eliminación de la mayor parte de este contaminante del agua residual.
- Por tratarse en un número importante de casos de hidrocarburos volátiles o sustancias inflamables, evitar la posible formación de atmósferas tóxicas y/o peligrosas.

- Disminuir riesgos de incendios por acumulación de compuestos potencialmente combustibles en las superficies.

Factores que afectan a la separación de grasas y aceites:

- Tipo y composición del aceite o hidrocarburo que se pretende eliminar.
- Estado en que se encuentra el aceite en el agua residual.
- En estos procesos no se eliminan aquellas grasas y aceites que se encuentren emulsionados o bien disueltos.
- Número de Reynolds global del flujo.
- Tamaño de la gota (de forma generalizada se diseña para eliminar aquellas partículas de diámetro igual o superior al fijado previamente, normalmente 0,15 mm).

### 2.3. Separadores de agua-hidrocarburos

El separador de aceites y grasas funciona por diferencia de densidad entre el agua y los aceites. Este efecto provoca dos fases distintas: la superior de grasas-aceites y la inferior de agua. El aceite separado se recoge de la canoa de separación, evitando así la salida de los aceites acumulados.

Las aguas residuales entran en el separador con un caudal específico, que a su vez este caudal ingresa por las diferentes cámaras del separador lo que produce una acumulación de los sólidos de la mezcla en el fondo del tanque del separador, mientras que las grasas y aceites de menor densidad que el agua se apartan y suben a la superficie por efecto de la gravedad, produciéndose la separación. En la canoa de separación, se recolecta dichos aceites e hidrocarburos. Dependiendo del diseño del separador, así será la cantidad de cámaras que se tenga; en cada cámara existirán baffles con celosías que ayudarán al proceso.

Por otra parte, la película de aceites e hidrocarburos tendrá un espesor mayor a medida que se vaya recolectando en el proceso, dependiendo del ajuste del separador, esta capa se vertirá dentro de la canoa recolectora la cuál dependiendo de su ajuste operativo descargará los residuos aceitosos fuera del separador.

A la salida del separador existirá una tubería de salida llamada sifón, ver figura 2.5, que permitirá la retención de los aceites en la parte superior de la superficie de agua, estos aceites no deberán pasar por dicho tubo sifón ya que podrían contaminar la descarga y no cumplir con los estándares de concentración de aceites en el agua que dicta el Reglamento de Vertido y Reuso de Aguas Residuales mencionado en la sección de Legislación Actual.

El proceso descrito anteriormente se puede visualizar de manera más práctica con la figura 2.4, que muestra los puntos A,B,C,D:

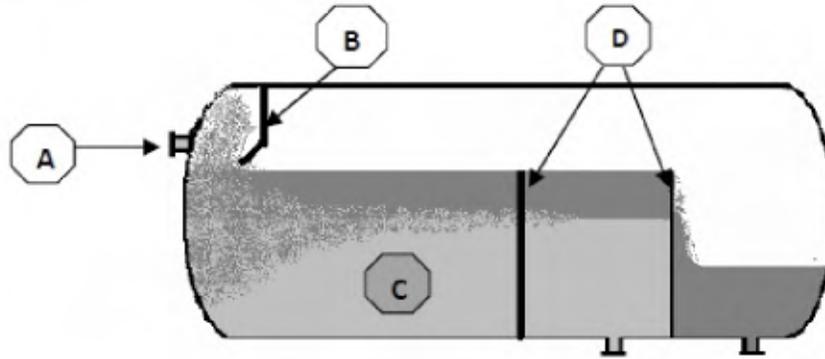


Figura 2.4: Funcionamiento básico de separador. Fuente: Oil-Water Separators, University of Washington (2008) [26]

De la figura 2.4, se tiene que para la etapa A, es donde el flujo de la mezcla ingresa a un caudal determinado, y en donde dicho caudal choca con una mampara o placa en el punto B. Esto ayuda a disminuir la turbulencia de la mezcla así permitiendo que disminuya la presión y el movimiento arbitrario de las partículas de la mezcla.

Luego, el fluido pasa al punto C en donde se da la separación descrita al inicio de esta sección; dicha separación se da por diferencia de gravedades específicas, además se facilita una dispersión de las partículas de la mezcla disminuyendo la velocidad y la presión, de tal forma se comienza a formar la película de aceite en la superficie del separador.

En el punto D, se tienen las cejillas ajustables permiten separar la película recolectada en la superficie con respecto al agua, permitiendo que el agua separada de los hidrocarburos(aceite) salga con la menor cantidad de contaminación.

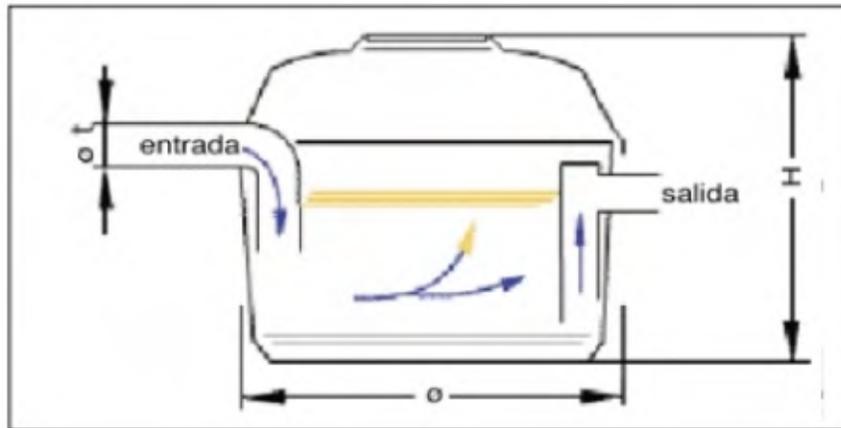


Figura 2.5: Funcionamiento básico de separador. Fuente: Sainz Sastre (2004) [30]

La velocidad de ascenso de las partículas o glóbulos de aceite hacia la superficie está relacionada con la diferencia de peso específico que se tiene entre los aceites o hidrocarburos a separar y la fase acuosa que presenta el agua de desecho; el peso específico del agua, así como su viscosidad, son función de la temperatura del agua. En el caso de que ambos pesos específicos sean muy próximos, o bien un valor superior el del aceite a separar, estos procedimientos no son de aplicación.

Para el diseño y funcionamiento de los separadores de agua-aceite, se debe considerar primero cuanto más cercano sea el valor de la gravedad específica del aceite al del agua, más lenta será la velocidad con la que los glóbulos asciendan a su superficie.

Otro aspecto a considerar es la temperatura a la cual se presentan las aguas de desecho, cuanto menor sea la temperatura, nuevamente, más lento será el ascenso de los glóbulos de aceite a la superficie. Además, que el tamaño de las gotas o glóbulos de aceite, tienen su efecto en la velocidad de ascenso en donde los glóbulos con tamaños pequeños durarán más en ascender a la superficie del tanque del separador.

Se debe precalentar la mezcla en el separador hasta un máximo de 40°C, así cumpliendo con lo establecido en el Reglamento de Reuso y Vertido de Aguas Residuales, y por esta razón mejorar el proceso de separación y la eficiencia del separador.

La velocidad ascensional de una gota de aceite dentro de la masa de agua viene determinada por la ley de Stokes (ver sección de simbología):

$$V_t = \frac{g * D^2 * (\rho_w - \rho_o)}{18 * \mu} \quad (2.1)$$

Donde;

$V_t$  es la velocidad ascensional vertical en  $cm/s$   
 $g$  es la aceleración de la gravedad en  $cm/s^2$   
 $D$  es el diámetro del glóbulo de aceite en  $cm$   
 $\rho_w$  es la densidad del agua en  $g/cm^3$   
 $\rho_o$  es la densidad del aceite en  $g/cm^3$   
 $\mu$  es la viscosidad dinámica del agua contaminada

Según Kirby, S. Mohr (2001); dentro de las consideraciones que se deben hacer al aplicar la ley de Stokes en la teoría de separación se tienen:

- Las partículas son esféricas
- Las partículas se asumen del mismo tamaño
- El flujo debe ser continuo horizontalmente y verticalmente, debe ser laminar sin presencia de turbulencia

La manera de como suben las partículas de aceite a la superficie de agua, se rigen por la ley de Stokes ya mencionada anteriormente. Cabe destacar que las variables más considerables de este fenómeno de separación están: la viscosidad de líquido, la diferencia entre la gravedad específica del líquido y la partícula, y el tamaño de la partícula.

Cabe destacar que los parámetros asociados a la velocidad de subida de los glóbulos de aceite a la superficie utilizando la Ley de Stokes, son de suma importancia ya que con ellos se diseña el tamaño del tanque del separador.

Para ello se toman en cuenta las gotas o glóbulos de aceite con una trayectoria iniciando desde el fondo de los módulos separadores y llegando a la superficie del agua. Dado que las gotas de aceite no son todas del mismo tamaño, tienen la tendencia en unirse unas con otras incrementando el tamaño de la gota. Un flujo turbulento haría difícil que la subida de los glóbulos de aceite sea ordenada con gotas pequeñas. Ver figura 2.6.

Como menciona Kirby S. Mohr (2001), "El tiempo de estancia de la mezcla para la separación juega un papel muy importante a la hora del diseño del separador ya que se necesita saber el tiempo de subida de los glóbulos o gotas de aceite hacia la superficie del agua antes que el flujo del agua con aceite salga por el lado opuesto del separador" [3].

El tiempo de estancia de la mezcla en estado de estanqueidad será de gran importancia a la hora de la salida del separador para que el fenómeno se desarrolle de la mejor forma.

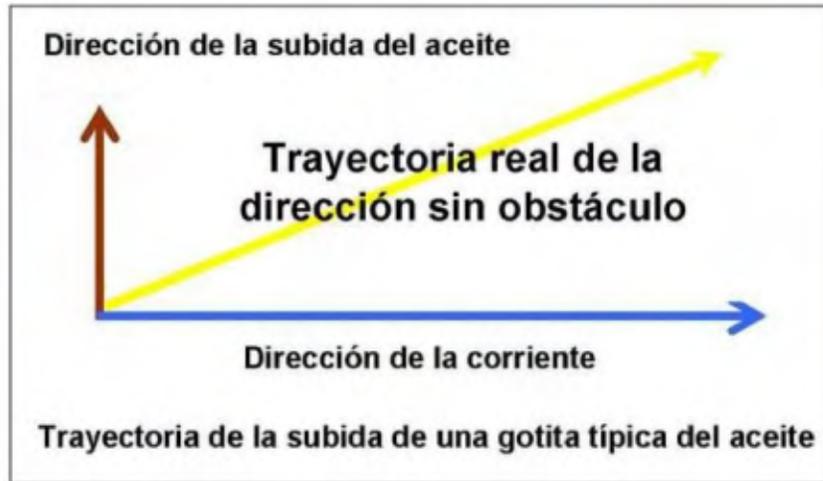


Figura 2.6: Diagrama de ascenso de partículas de aceite e hidrocarburos. Fuente: Kirby, S. Mohr (2001)

En la figura 2.6, se denota la dirección de la corriente que lleva la mezcla a separar que siempre es horizontal hasta su descarga. Se ejemplifica la trayectoria que tienen los glóbulos de aceite-hidrocarburos en un separador, en donde claramente se denota como los globulos de aceite-hidrocarburos se desplazan de manera lineal verticalmente, siempre y cuando no exista alguna turbulencia asociada en el proceso que pueda afectar dicha trayectoria. Los globulos subirán siguiendo la ley de Stokes mencionada al inicio de esta sección, contemplando que no exista un cambio brusco en la entrada del flujo al separador.

Históricamente, el diseño de separadores agua-aceite convencionales se basó en criterios desarrollados por la API, iniciando en 1948 en la Estación Experimental de Ingeniería en la Universidad de Wisconsin. Desde entonces, un gran número de separadores agua-aceite, basados en el criterio de diseño desarrollado por la API, ha sido diseñado y puesto en operación a lo largo de la industria petrolera.

El criterio fue desarrollado como un lineamiento voluntario para el diseño convencional de separadores agua-aceite. Muchos otros separadores basados en parte en criterio de diseño desarrollado por API fueron adaptados para una variedad de industrias en las que se requiere un tratamiento de aguas de desecho.

La norma API 421 (1990) resalta dos tipos de separadores: el separador API convencional y el separador de placas paralelas. Los dos tipos de separadores agua-aceite hoy en día existen en una gran variedad de diseños, pero todos se derivan de estos dos tipos convencionales. Cabe destacar que el separador de acanalado de placas corrugadas CPI, es una subdivisión de los separadores PPI; ya que en alguna literatura esta subdivisión se puede considerar un tercer tipo de separador.

### Separadores convencionales (Canal Rectangular)

Los separadores API están conformados por estanques rectangulares multicanales, los cuales disponen de una zona de entrada, una zona de separación agua-aceite y una zona de salida. Este separador es del tipo gravitacional, funciona por diferencia de densidades entre dos líquidos inmiscibles. El fluido de menor densidad tenderá a elevarse sobre el de mayor densidad.

Este diseño proporciona un espacio con medidas de longitud, ancho y profundidad tales que provee un espacio donde el flujo es cuasi estático por lo tanto permite que los glóbulos de aceite disueltos en el agua se eleven hasta la superficie. Este diseño, conocido como el separador API convencional, libera una vez tratado por lo general una concentración de aceite de 100 partículas por millón (ppm). A continuación se muestra un esquema de este tipo de separador mencionado en la figura 2.7:

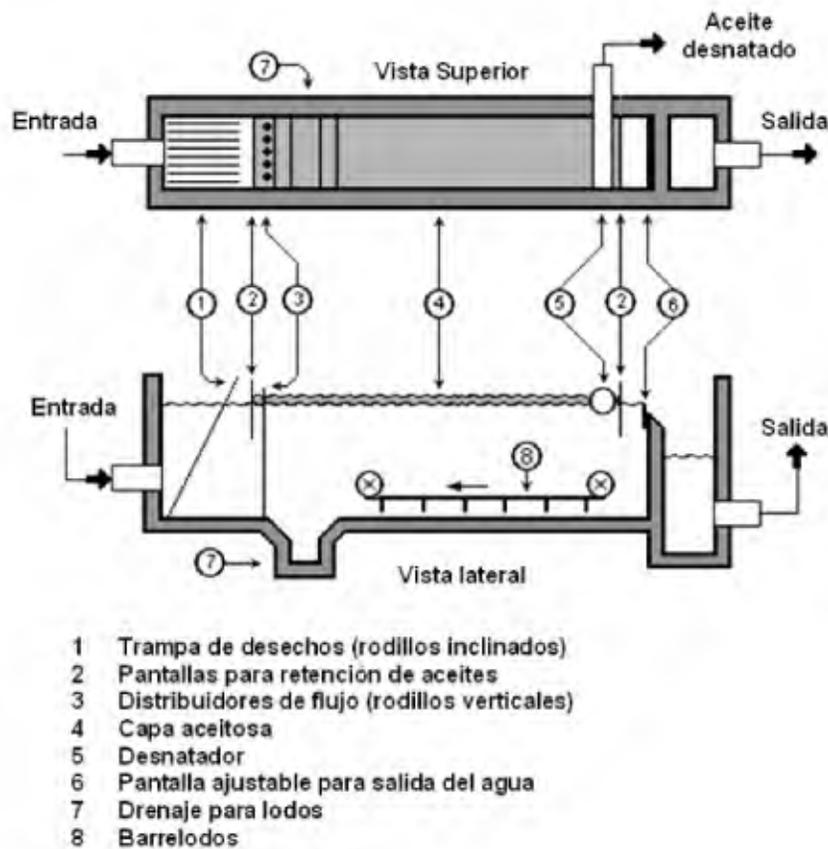


Figura 2.7: Separador API Canal Rectangular. Fuente: Monografía API 421 (1990)

Dentro de las ventajas que posee este tipo de separador, se mencionan según Ramalho, R.S. (1993)[28];

- Una operación más sencilla
- Un fácil mantenimiento con respecto a los separadores CPI (Acanalado de placas) esto debido, a que las placas en los separadores CPI, sin un debido mantenimiento calendarizado se puedan llenar de lodos u otras partículas que afecten a eficiencia del separador.

Por otra parte también se mencionan las desventajas que poseen, según Ramalho, R.S. (1993)[28];

- Ocupan más espacio para su montaje

- Limitada eficiencia para glóbulos de aceite o hidrocarburos de menos de 0,015 cm
- Presenta dificultades para el manejo de olores y vapores

### **Separadores PPI (Placas Paralelas)**

El separador de placas paralelas funciona con un concepto de operación es básicamente igual al anterior, sin embargo se añade un área lo bastante grande que se encuentre en contacto con el agua residual. Entre mayor área superficial proveída, más se amplifica el proceso de separación típico. El área superficial se aumenta al colocar varias placas paralelas de forma inclinada, con esto los glóbulos de aceite comienzan a elevarse y se agrupan con otros glóbulos para formar gotas de mayor tamaño que ascienden más rápidamente.

El flujo que atraviesa las placas paralelas puede ser de 2 a 3 veces el equivalente al flujo que atraviesa un separador convencional de canal rectangular, además que al tener placas paralelas tiene como ventajas se tiene que se puede reducir significativamente el tamaño del tanque del separador al menos 2 veces su ancho y 10 veces su largo, así se obtiene un mayor rendimiento en la separación por gravedad, además que muestra ventajas de espacio en la planta. Con este tipo de separadores se pueden obtener concentraciones de aceite de 10 ppm.

Otra de las ventajas de este tipo de separador es la que las placas paralelas pueden reducir la turbulencia característica de la mezcla a la entrada del separador, aumentando así la eficiencia de operación del mismo. Lo anterior se debe a que según la norma API 421, estas placas pueden presentar un ángulo de inclinación de entre 45° a 60°, lo anterior con el objetivo que los sólidos o lodos que se presenten en la mezcla choquen con dichas placas inclinadas y se sedimenten en el fondo del tanque del separador, permitiendo que los glóbulos de aceite asciendan a la superficie del agua para su posterior recolección.

Este tipo de separadores permiten que se incremente la capacidad del separador y por ende la entrada de valores mayores de flujo, además que son capaces de remover los glóbulos de aceite libre e hidrocarburos de manera más sencilla que los convencionales.

Segun la monografía API 421 (1990) [1], los separadores de placas paralelas pueden presentar problemas de acumulación de sólidos o lodos debidos al proceso, lo que puede ocasionar taponamiento entre las placas y esto ocasiona una disminución significativa del flujo. Para evitar el fenómeno anterior se debe cumplir con los respectivos mantenimiento y limpieza periódica del separador, pero un separador de placas paralelas con los criterios de diseño e instalación correctos, no debe presentar este tipo de problemas.

### **Separadores CPI (Acanalado de placas corrugadas)**

Este tipo de separador, más moderno, utiliza el mismo concepto de operación que el separador PPI, con la variante de que las placas agregadas son con una forma acanalada lo que permite que los glóbulos de aceite se agrupen con mayor facilidad y puedan permitir mayores eficiencias para espacios más reducidos. A continuación se muestra un esquema de este tipo de separador mencionado en la figura 2.8:

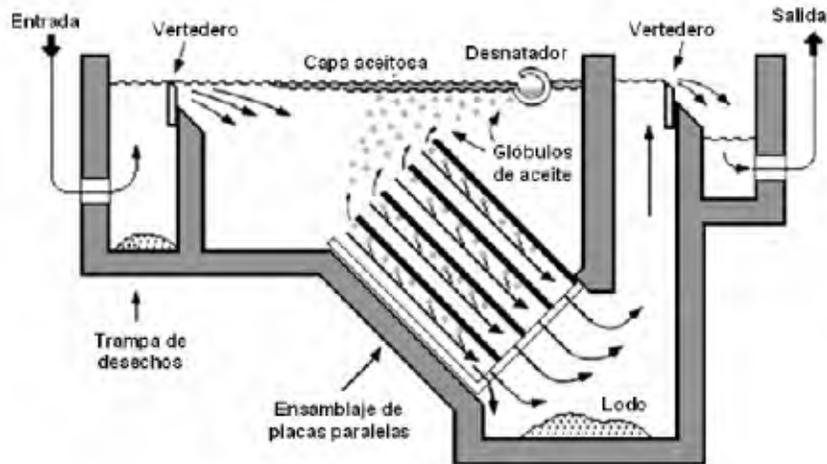


Figura 2.8: Separador CPI Acanalado de placas. Fuente: Monografía API 421 (1990)

A medida que el agua fluye a través de las placas inclinadas, los glóbulos de aceite flotan hacia la parte cóncava de las mismas donde se unen entre sí para formar masas de mayor tamaño que se desplazan a lo largo de los platos hasta alcanzar la superficie. De la misma forma, los sólidos que se encuentran suspendidos, al pasar entre las placas, chocan con las mismas y entre sí, para luego dirigirse al fondo por acción de la gravedad produciéndose la separación.

Dentro de las ventajas que posee este tipo de separador, se mencionan según Ramalho, R.S. (1993)[28];

- Excelente operación a altas temperaturas
- Adecuados para caudales bajos
- Equipo sencillo de operar
- Más compactos que separadores API

Por otra parte, las desventajas que poseen, según Ramalho, R.S. (1993) [28];

- Mayor frecuencia de mantenimientos, para evitar acumulación de lodos
- Eficiencia limitada para tamaño de glóbulo inferior a 0,006 cm
- La limpieza de las placas se puede dificultar para ciertas profundidades
- Presenta problemas para manejar efluentes con alto contenido de hidrocarburos

## 2.4. Normas utilizadas en el diseño de separadores de agua-hidrocarburos

### 2.4.1. Marco Legal-Ambiental Ley N° 33601

En Costa Rica el vertido de las aguas residuales está regulado por medio del *Reglamento de Vertido y Reuso de Aguas Residuales - Ley N° 33601*. Este tiene como premisa "que proteger el recurso hídrico es proteger la salud del hombre y la vida sobre La Tierra, y es un elemento sustancial para alcanzar el desarrollo sostenible del país" [22]. Por medio de este reglamento se establece la obligatoriedad de dar tratamiento a las aguas residuales por parte de los entes generadores de las mismas. Asimismo

obliga a realizar reportes operacionales, los cuales deben ser presentados periodicamente al Ministerio de Ambiente y Energía (de ahora en adelante MINAE).

El artículo 14 establece los parámetros universales de análisis obligatorio en aguas residuales. Estos son [22]:

- Caudal.
- Demanda bioquímica de oxígeno (DBO<sub>5,20</sub>).
- Demanda química de Oxígeno (DBQ).
- Potencial de hidrógeno (pH).
- Grasas y aceites (GyA).
- Sólidos sedimentables (SSed).
- Sólidos suspendidos totales.
- Sustancias activas al azul de metileno (SAAM).
- Temperatura (T).

En los artículos 18 y 20 se definen los límites para estos parámetros. Estos se pueden consultar en la sección de anexos. Existe una división entre el vertido a alcantarillados sanitarios y el vertido a cuerpos receptores. El reglamento define cuerpo receptor como *"todo aquel manantial, zonas de recarga, río, quebrada, arroyo permanente o no, lago, laguna, marisma, embalse natural o artificial, canal artificial, estuario, manglar, turbera, pantano, agua dulce, salobre o salada, donde se vierten aguas residuales."* [22]

Por lo general los límites del vertido a cuerpos receptores son mas bajos, debido a que a diferencia de los alcantarillados sanitarios no se cuenta con un tratamiento de agua, y las aguas residuales son descargadas directamente al cuerpo donde existe flora y fauna, generando una afectación más directa.

El artículo 15 adiciona parámetros que deben analizarse dependiendo de la actividad realizada por el ente generador. No menciona específicamente a la generación eléctrica, sin embargo, para fines prácticos se considerará esta actividad similar a la de Venta al detalle de combustibles para automotores, esto porque ambos manejan hidrocarburos.

Debido a esta actividad se adiciona un límite a los hidrocarburos presentes en el agua residual, y en los artículos 19 y 21 se definen el límite máximo. Adicionalmente, el artículo 23 establece un límite de 125 mg/l de grasas/aceites [22].

#### **2.4.2. Norma API 421**

Como referencia principal para el desarrollo del presente proyecto, fundamentalmente se utilizará literatura que se ha desarrollado por parte de los fabricantes de separadores de este tipo. La monografía API 421 de la American Petroleum Institute, denominada Diseño y Operación de separadores aceite-agua brindará las pautas básicas generales para fundamentar el diseño.

El propósito de esta monografía es presentar una guía de diseño para los sepadores de gravedad tipo agua-aceite que se utilizan en las plantas industriales que utilizan hidrocarburos en sus procesos [1].

Esta monografía además provee consejos prácticos para resolver problemas en la operación y el mejoramiento de las características operativas de los separadores. Además establece la diferencia de 3 tipos de separadores que sirven para la disociación de los aceites con respecto al agua en función de su gravedad específica, los cuáles normalmente se denominan separadores de canales rectangulares del tipo convencional, separadores de placas paralelas (PPI) y separadores del tipo acanalado de placas corrugadas (CPI).

Cabe destacar que según lo visto en la sección de tipos de separadores, una de las mejores hechas en el tipo de separador rectangular fue la instalación de placas paralelas, a lo largo de la cámara de separación, en dirección del flujo, luego de dicha modificación, se desarrolló el de tipo acanalado de placas corrugadas que se coloca con cierto ángulo de inclinación en dirección del flujo, estas placas tienen una cierta separación entre ellas, brindando mayor eficiencia en la separación de los hidrocarburos (aceite).

La monografía resume y se convierte en guía práctica para aquellos que incursionarán en el diseño de separadores, contemplando información de los manuales API publicados anteriormente para resolver problemas de la separación en aguas de desecho en refinerías e industrias.

En los procesos industriales, los flujos de aguas contaminadas contienen aceite en tres diferentes estados: aceite libre, aceite emulsificado, aceite disuelto.

- *Aceite libre*: este está conformado por glóbulos de aceite de suficiente tamaño de manera que pueden ascender como resultado de las fuerzas de flotabilidad hasta la superficie del agua por el fenómeno de diferencia de densidades, formando capas en la parte superior del agua. Bajo ciertas condiciones de flujo, este aceite que flota puede ser separado del agua por gravedad.

La separación del agua y del aceite es función del tiempo de permanencia en que la mezcla se hace reposar, de las diferencias de la gravedad específica y temperatura y de la estabilidad de la emulsión. En algunos casos, las partículas aceitosas sólidas (lodos) que tienen una gravedad específica superior a 1, se asentarán en el fondo del separador.

- *Aceite emulsificado*: está en la forma de pequeños glóbulos de aceite de menos de 20 micrones de diámetro (1-10 micrones). Estos glóbulos forman una suspensión estable en el agua como resultado de las fuerzas entre partículas con respecto a las fuerzas boyantes.

La presencia de estas partículas también contribuyen a la formación de emulsiones que no necesariamente se van a separar a no ser que exista una condición de reposo, y la adición de productos químicos que faciliten la separación, flotación o coalescencia, pero no por separación por gravedad.

- *Aceite disuelto*: es la fracción del petróleo que forma una solución molecular con el agua, el aceite disuelto no puede ser separado por gravedad, a no ser que el tratamiento de las aguas se logre por ejemplo con tratamientos biológicos, en caso que sea necesaria esta separación.

Es necesario establecer los siguientes parámetros a la hora de diseñar un separador (su cuerpo principal):

- *Caudal*
- *Temperatura del agua contaminada*
- *Gravedad específica del agua contaminada*
- *Viscosidad dinámica del agua contaminada*

- *Gravedad específica de la fracción de aceite*
- *Tamaño de las gotas de aceite libre*

Una vez determinados estos parámetros, se procede a calcular las principales características de diseño tomando en cuenta los siguientes cálculos iniciales para el diseño del cuerpo principal del separador:

- *Velocidad de ascenso del globo de aceite:* Esta se determina a partir de una variación de la Ley de Stokes, y se calcula con la siguiente ecuación:

$$V_{as} = \frac{g \cdot (r_o)^2 \cdot (\rho_w - \rho_o)}{18 \cdot \mu_w} \quad (2.2)$$

En donde;

$g$  es la aceleración de la gravedad en  $m/s^2$ ,

$r_o$  es el radio del globo de aceite en  $m$ ,

$\rho_w$  es la densidad del agua en  $kg/m^3$ ,

$\rho_o$  es la densidad del aceite en  $kg/m^3$ ,

$\mu_w$  es la viscosidad dinámica del agua

- *Velocidad horizontal:* La velocidad horizontal  $V_h$  se recomienda que sea la menor entre las siguientes recomendaciones: 15 veces la velocidad de ascenso:

$$V_h = 15 \cdot V_{as} \quad (2.3)$$

En donde debe dar como resultado menor a  $0,01524 m/s$  ó  $(3 pie/min)$ .

- *Área mínima de sección transversal vertical:* Esta área se determina por medio de la siguiente relación:

$$A_c = Q_e/V_h \quad (2.4)$$

En donde;

$A_c$  es el área transversal en  $m^2$  ó  $pie^2$ ,

$Q_e$  es el caudal de entrada de la mezcla en  $m^3/s$  ó  $pie^3/min$  y

$V_h$  es la velocidad horizontal  $m/s$  ó  $pie/min$ .

- *Número requerido de canales del separador:* Es recomendable que el separador tenga al menos dos canales, para en caso de mantenimiento poder tener al menos uno habilitado mientras se trabaja con el otro.

Es recomendable que las dimensiones transversales máximas de cada canal sean  $6,02 m$  (20 pies) de largo por  $2,438 m$  (8 pies) de ancho, por lo que el número de canales requeridos se puede calcular mediante la siguiente relación:

$$n = A_c/160 \quad (2.5)$$

- *Profundidad y ancho del canal* Dado el área total de sección transversal de los canales  $A_c$  y el número de canales deseados ( $n$ ), el ancho y la profundidad de cada canal puede ser determinado.

El ancho de un canal  $W_c$  de entre 1,8288 m (6 pies) y 6,02 m (20 pies) debe ser sustituido en la siguiente ecuación, al resolver para la profundidad ( $d$ ):

$$d = \frac{A_c}{W_c} \quad (2.6)$$

donde,

$d$  = profundidad del canal, en  $m$  ó  $pies$ .

$A_c$  = área vertical de sección transversal mínima, en  $m^2$  ó  $pie^2$ .

$W_c$  = ancho del canal, en  $m$  ó  $pies$ .

$n$  = número de canales (adimensional).

La profundidad del canal obtenida debe concordar con los rangos aceptados para la profundidad 0,91 m - 2,43 m ó (3-8 pies) y la razón profundidad-ancho (0,3-0,5).

$$\frac{V_h}{V_{as}} \quad (2.7)$$

▪ *Factor de diseño:*

El factor de diseño  $F_d$  es el producto del factor de turbulencia  $F_T$  por el factor de cortocircuito  $F_{cc}$ ; este factor de turbulencia se calcula:

$$F_d = F_T \cdot F_{cc} \quad (2.8)$$

El factor de cortocircuito  $F_{cc}$  según esta norma API 421, se asume siempre como 1,2 y el factor de turbulencia se calcula con:

$$F_T = 0,0228 \cdot \frac{V_h}{V_{as}} + 1,0137 \quad (2.9)$$

▪ *Largo del separador* Una vez determinados el ancho y la profundidad, la última dimensión, el largo del canal ( $L$ ), se encuentra utilizando la ecuación:

$$L = F_d \cdot \frac{V_h}{V_{as}} \cdot d \quad (2.10)$$

En donde,

$L$  = largo del canal, en  $m$  ó  $pies$ .

$F_d$  = factor de diseño (adimensional).

$V_h$  = velocidad horizontal, en  $m/s$  ó  $pie/min$ .

$V_{as}$  = velocidad vertical ascensional del glóbulo de aceite de diseño, en  $m/s$  ó  $pie/min$ .

$d$  = profundidad del canal, en  $m$  ó  $pies$ .

Si es necesario, el largo del separador debería ajustarse para ser al menos 5 veces su ancho, para minimizar los efectos de la entrada y salida que pueden provocar turbulencia.

- *Área mínima horizontal* Tomando en cuenta el factor de diseño  $F_d$ , el área horizontal mínima ( $A_H$ ), se obtiene mediante:

$$A_H = F_d \cdot \left( \frac{Q_e}{V_{as}} \right) \quad (2.11)$$

En donde,

$F_d$  = factor de diseño (adimensional).

$Q_e$  = Caudal de mezcla, en  $m^3/s$  ó  $pie^3/min$ .

- *Altura Vertedero de Salida*

Se tiene la ecuación de Francis resumida:

$$H = d - 0,212 \cdot \left( \frac{Q_e \cdot L}{A_c} \right)^{\frac{2}{3}} \quad (2.12)$$

En donde;

$Q_e$  = Caudal de mezcla, en  $m^3/s$  ó  $pie^3/min$ .

$d$  = profundidad del canal, en  $m$  ó  $pies$ .

$A_c$  = área vertical de sección transversal mínima, en  $m^2$  ó  $pie^2$ .

### 2.4.3. Norma ASTM A36

El acero A36 es la designación de la Sociedad Estadounidense para Pruebas y Materiales (ASTM, siglas en inglés) para el acero al carbono. Esta norma es aplicable a una gran variedad de perfiles estructurales laminados en caliente y a placas de la misma calidad que aún están disponibles en el mercado. Tiene un esfuerzo de fluencia de 2 530 kg/cm<sup>2</sup> (250 MPa, 36 ksi) y un esfuerzo mínimo de ruptura en tensión de 4 080 kg/cm<sup>2</sup> a 5 620 kg/cm<sup>2</sup> (400 a 550 MPa, 58 a 80 ksi), y su soldabilidad es adecuada.

Se desarrolló desde hace muchos años en Estados Unidos para la fabricación de estructuras remachadas, atornilladas y soldadas, mejorando el contenido de carbono de los aceros disponibles en aquella época, como el ASTM A7. Con la innovación de este tipo de acero, las conexiones soldadas empezaron a desplazar a las remachadas que pronto desaparecieron.

El A36 ha sido uno de los grados de acero primarios para todos los tipos de estructuras. Casi todos los tamaños y tipos de perfiles y placas están todavía disponibles en el A36 (excepto los perfiles IR, W ó H), aunque el esfuerzo de fluencia mínimo especificado baja a 2,250 kg/cm<sup>2</sup> (32 ksi) para espesores de placa de más de 203 mm (8 pulgadas).

### 2.4.4. Normas ANSI-ASME

Existen gran cantidad de normas las cuales se pueden aplicar a la elección y dimensionamiento de tuberías pero se consultaron las normas conjuntas del American Standard Institute (ANSI) y la American Society of Mechanical Engineers (ASME); como lo son las normas:

- B31.1 (1989) Power Piping
- B31.3 (1990) Chemical Plant and Petroleum Refinery Piping.
- B31.4 (1989) Liquid Transportation System for Hydrocarbons, Petroleum, Gas, Anhydrous Ammonia and Alcohols.

Estas normas son el conjunto de numerosas experiencias de empresas especializadas, ingenieros, investigadores, desarrolladores de proyectos o ingenieros en áreas de aplicación muy específicas. Las normas anteriores son muy parecidas con respecto a sus condiciones de diseño, cálculos y factores o rangos admisibles.

#### 2.4.5. Norma API 650

La norma API 650 establece las pautas para el diseño de un tanque de almacenamiento de hidrocarburos, los estándares mínimos para requerimientos de materiales, diseño, fabricación, tamaños de uniones soldadas en tanques. Esta norma no presenta las dimensiones exactas de tanques para los fluidos a tratar, sino que más bien permite al usuario a tener criterio en ese aspecto, dependiendo de sus necesidades.

Según la norma API 650 (2013) [8], para el mejor diseño, cálculo, y manufactura de tanques de almacenamiento es importante la selección del material adecuado dentro de la variedad de aceros que existen en el mercado; a continuación se enlistan los más utilizados descritos en la norma:

- A-36 Acero Estructural:

Se utiliza en espesores  $t$  iguales o menores a 38 mm (1 1/2”), este material es aceptable ya que es utilizado en perfiles comerciales o ensamblados de los elementos estructurales del tanque. Su costo es accesible y su montaje y soldabilidad se facilita. Se utiliza mucho en construcción de tanques de combustibles.

- A-131 Acero Estructural:

Existen varios grados que se dividen en este material Grado A ( $t \leq 12,7$  mm), Grado B ( $t \leq 25,4$  mm), Grado C ( $t \leq 38$  mm), Grado EH36 ( $t \leq 44,5$  mm).

- A-283 Placas de acero al carbón con medio y bajo esfuerzo a la tensión:

Son de Grado C; para espesores  $t \leq 25$  mm (1”). Este es un material que se utiliza mucho tanto para perfiles estructurales como para paredes, piso, accesorios y techo de tanques.

- A-516 Placas de acero al carbón para temperaturas de servicio moderado:

Son de Grado 55, 60, 65 y 70. Para espesores de alta calidad, costo elevado, por lo que se recomienda utilizar solo en casos donde se requiere cumplir con un elevado esfuerzo de tensión cuando se justifique.

- A-53:

Grados A y B; se utiliza en tubería general.

En la figura 2.9 se muestran las características de los posibles materiales para la construcción de un tanque de almacenamiento de hidrocarburos:

ESPECIFICACIÓN DE MATERIAL	GRADO	MÁXIMO ESPESOR DE PLACA	
		mm	(pulg)
ASTM A 36 / A 36M	-----	40	(1½)
ASTM A 131 / A 131M	A	12,5	(½)
	B	25	(1)
	CS	40	(1½)
	EH 36	45	(1¾)
ASTM A 283 / A 283M	C	25	(1)
ASTM A 285 / A 285M	C	25	(1)
ASTM A 516 / A 516M	55 (360)	40	(1½)
	60 (415)		
	65 (450)		
	70 (485)		
ASTM A 537 / A 537M	1	45	(1¾)
	2		
ASTM A 573 / A 573M	58 (400)	40	(1½)
	65 (450)		
	70 (485)		
ASTM A 633 / A 633M	C	45	(1¾)
	D		
ASTM A 662 / A 662M	B	40	(1½)
	C		
ASTM A 670 / A 670M	A	40	(1½)
	B	45	(1¾)
ASTM A 737 / A 737M	B	40	(1½)
ASTM A 841 / A 841M	A Class 1	40	(1½)
	B Class 2		
CSA G40.21	38W (260W)	25	(1)
	44W (300W)	25	(1)
	50W (350W)	45	(1¾)
	38WT (260WT)	40	(1½)
	44WT (300WT)	40	(1½)
	50WT (350WT)	50	(2)
ISO 630	E275 C y D	40	(1½)
	E355 C y D	45	(1¾)

Figura 2.9: Materiales según norma API 650 para un tanque metálico. Fuente: Norma API 650 (2013)

La norma API 650 da la pauta para el cálculo de espesores de pared para tanques de almacenamiento de hidrocarburos; en dichos espesores se toma en cuenta el largo  $L$ , y la altura del tanque  $H$ , además de los esfuerzos  $S_y$  y el valor de corrosión permitido  $CA$  que varía dependiendo de las paredes, piso y techo. La ecuación 2.13 ejemplifica dicho cálculo con esas variables mencionadas:

$$t_{laminas} = 2,45 \cdot L \cdot \sqrt{\frac{\alpha \cdot H \cdot 0,036 \cdot sg}{S_y}} + CA \quad (2.13)$$

En donde;

$t_{laminas}$  es el espesor de la lámina del material en pulgadas,

$L$  es la longitud del tanque en *in*,

$H$  es la altura del tanque del separador en pulgadas,

$sg$  es la gravedad específica,

$CA$  es el factor de corrección por corrosión,

$S_y$  es el esfuerzo mínimo permisible en *psi*

$\alpha$  es el factor de relación que depende de la altura y largo del tanque en figura 2.10.

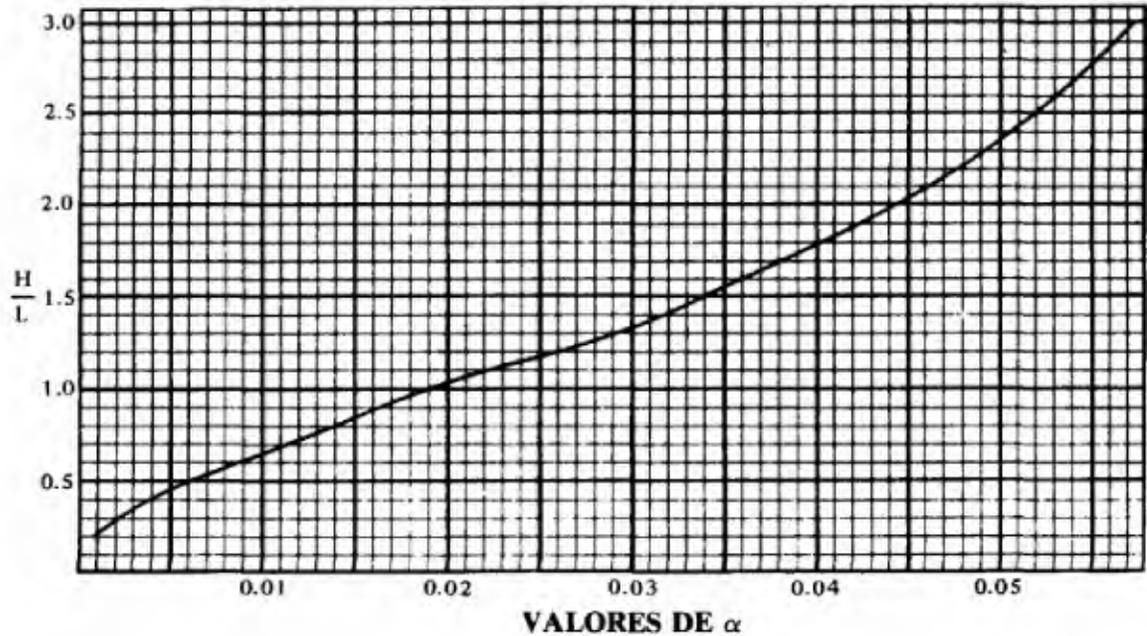


Figura 2.10: Valores de alfa para cálculos en tanques rectangulares. Fuente: Norma API 650 (2013)

## 2.5. Conformación general del separador

En el diseño de un separador se deben considerar varias secciones, y cada una cumple con una función particular del proceso, a continuación en las siguientes subsecciones se detallan y explican cada una.

### 2.5.1. Cámaras o secciones del separador

Los separadores API consisten de estanques rectangulares multicanales, los cuales disponen de una sección de entrada, una sección de separación aceite-agua y una sección de salida. A continuación se detalla cada una:

#### 1. Sección de entrada:

La sección de entrada comprende un canal de pre-separación que cumple las funciones de reducción de velocidad del flujo entrante por la tubería de acceso y remoción de material flotante (sólidos y aceites). El canal de pre-separación está cubierto para minimizar las pérdidas por evaporación. Las velocidades recomendadas para esta sección son de 0,05 – 0,10 m/s ó (10 pie/min a 20 pie/min).

Estas velocidades, por ser tan bajas, permiten el asentamiento de sólidos sedimentables, por lo que esta sección debe contar con un sistema que permita remover los mismos. Los tiempos de remoción satisfactorios en esta sección oscilan entre 2 y 4 minutos. Para ello se contempla un sistema de bombeo de sólidos sedimentables.

Además esta sección contempla el ingreso de la mezcla al tanque de separación, el cual se hace a través de cada canal y posteriormente una pantalla de distribución con Jets encargados de optimizar el perfil de velocidad del fluido.

## 2. Sección de separación:

La sección de separación está conformada por los canales de separación, los cuales disponen de las canoas de recolección de aceite. En estos canales de separación se recolectan principalmente los sólidos sedimentables, los cuales son arrastrados desde cualquier punto de la longitud del canal. Las tolvas están conectadas a tuberías que conducen este lodo hasta una tanquilla de lodos, desde donde serán posteriormente bombeados.

## 3. Sección de salida:

La sección de salida se refiere al vertedero de pared localizado después de la canoa de recolección de hidrocarburos-aceite. El agua fluye por arriba de la cejilla del nivel de agua, permitiendo que solamente se vierta en esta última sección el agua separada y lista para continuar el proceso, o verter al cauce del río dentro de los parámetros que dicta el Reglamento de Vertido y Reuso. Se tiene un tubo sifón que evita que algún exceso de aceite salga junto con el agua separada.

### 2.5.2. Jets o deflectores de entrada cóncavos

Se utilizan para disminuir el flujo turbulento de la mezcla agua-hidrocarburos a la entrada del separador, cuenta con material que la recubre capaz de atrapar ciertos sólidos o partículas contaminantes de la mezcla, dichas partículas se van hacia el fondo del separador.

Según la norma API 421 (1990) [1], cumplen una función parecida a la de la mampara o deflector de entrada, pero depende del diseño es el conjunto de orificios en donde se instalan estos accesorios, que tienen forma cóncava para cuando ingrese el caudal de entrada al separador, la velocidad será lo menor posible y así se obtiene un flujo laminar. Se toman las siguientes consideraciones para el diseño de los jets, que se presentan en la figura 2.11 en la página 31:

1. Los orificios en la entrada del separador son de igual diámetro todos y se colocarán uniformemente según el ancho del separador.
2. Los jets o baffles cóncavos tienen un radio de curvatura  $R$  que debe ser igual al diámetro  $D$  de los orificios.
3. El diámetro  $D$  será seleccionado para mantener la velocidad en 3 ft/s.
4. El diámetro del baffle cóncavo o jet será una pulgada más largo  $D + 0,0254$  en m ó  $(D+1)$  en pulgadas que el diámetro  $D$  del orificio.
5. La distancia adecuada entre el orificio y el jet debe ser de 0,25-0,6 veces el diámetro del orificio, lo anterior para evitar acumulación de sólidos.
6. Debe existir un agujero en el centro del baffle cóncavo de aproximadamente un 6% del diámetro  $D$  para mejorar la distribución del flujo entrante al separador.
7. La instalación y cuidado de los mismos es muy sencilla.

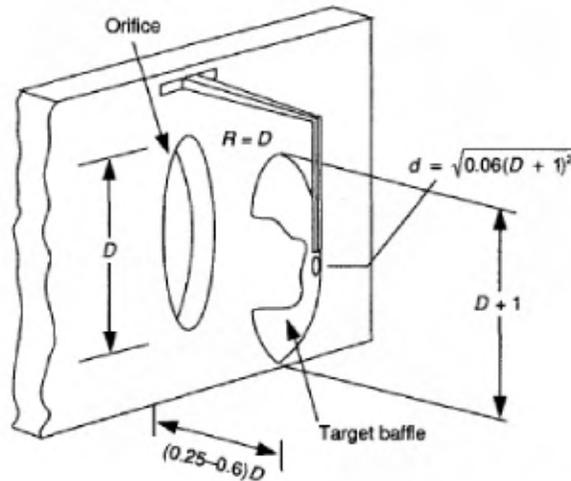


Figura 2.11: Jets o deflectores cóncavos. Fuente: Norma API 421 (1990)

### 2.5.3. Baffles o laberintos removibles

Cada baffle o laberinto sirve para dividir cada cámara o sección del separador antes mencionada. Estos baffles o laberintos cuentan con celosías, posicionadas de 45° a 60° según la normativa API, con recubrimiento u otro material en la parte inferior de cada una de ellas, para que lodos no pasen a la siguiente etapa del separador. Este separador tendrá 3 baffles removibles dado que estos aumentarán la eficiencia del proceso.

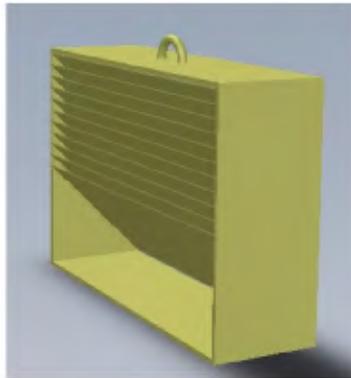


Figura 2.12: Baffles con celosías. Fuente: Elaboración propia (2016)

### 2.5.4. Cejillas móviles deslizables

- *Cejilla móvil de aceite (deslizable)*: Cumple la función de ajustar el espesor de la película de aceite. Esta cejilla se encuentra luego del último baffle, arriba del borde de la canoa de recolección. Esta se ajusta para permitir que la película de aceite que se asienta en la superficie del agua con un determinado espesor continúe hacia la canoa de recolección mencionada.
- *Cejilla móvil de agua (deslizable)*: Su función es la de ajustar el nivel del agua en el separador. Esta cejilla debe mantener el nivel del agua por encima del baffle ubicado en la sección de entrada, ya que si está por debajo de la altura máxima de este baffle, se estaría desaprovechando su área para la recolección de sólidos con las celosías.

### 2.5.5. Recolectores de aceite-hidrocarburos

En esta etapa del separador, la película de aceite-hidrocarburos con un espesor determinado se asentará en este lugar permitiendo la posterior recolección de los hidrocarburos separados. En la sección 3.4, se profundiza más sobre las dimensiones y funcionamiento de las mismas.

### 2.5.6. Tubos sifón

Se encuentra en la cámara o sección de salida y tiene forma de T para que solo se permita la salida de agua libre de hidrocarburos. En la sección 4.3, se profundiza más sobre las dimensiones y funcionamiento de los mismos.

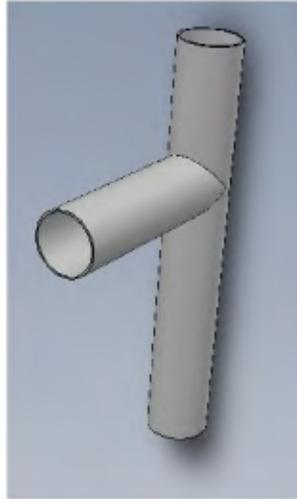


Figura 2.13: Tubos sifón. Fuente: Elaboración propia (2016)

Tienen la función de controlar el nivel inicial y final de descarga del agua, y permite trasegar el agua que se encuentra a una altura prefijada desde el fondo de la cámara de salida del separador. La altura de colocación de los tubos sifón se basó en la recomendación para altura de succión de una bomba que opera en un tanque. Además, no permite superar el nivel prefijado sobre la altura a la cuál se encuentra la descarga.

## 2.6. Sedimentación de lodos en el separador

La sedimentación es el asentamiento y remoción de las partículas suspendidas o lodos, que están presentes en una mezcla o compuesto y tiene un peso específico mayor al del agua y que en este proceso se da cuando el fluido está en un estado de estancamiento, y se presenta poca o nula turbulencia. La eficiencia del proceso de sedimentación se reducirá mucho si existe turbulencia asociada o circulación cruzada en el tanque del separador.

Según Fair, G. (1968) [24], las partículas tienen una velocidad de sedimentación distribuida en todo el tanque, y se debe hacer énfasis en que la eficiencia del separador para asentar o separar dichos glóbulos de hidrocarburos, y que está estrictamente relacionada con el caudal de entrada  $Q_e$  en el tanque del separador y el área de superficie del tanque.

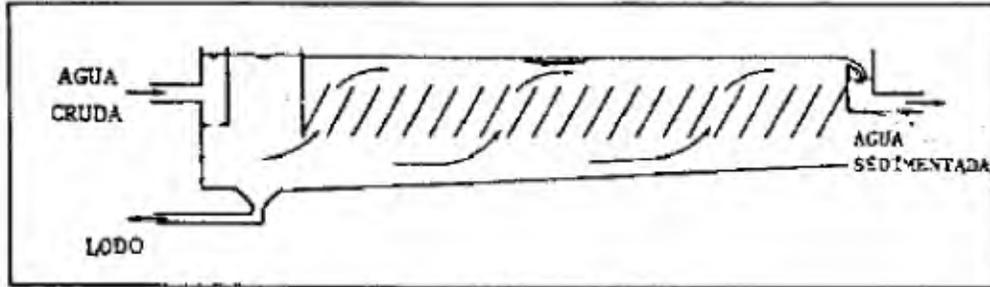


Figura 2.14: Esquema lodos en fondo del tanque. Fuente: Fair, G.(1968)

La sección 2.5, describe cada parte o componente del separador diseñado y una decisión trascendental del diseño es elegir el tipo de geometría del separador para que se obtenga la mayor eficiencia del mismo. La geometría del separador se diseñó tomando en cuenta dichas partes para que todas funcionen como un conjunto, además de basarse en normativas de referencias y los datos de campo recolectados.

El diseño del separador de agua-hidrocarburos contiene partes que están relacionadas entre sí, cumpliendo funciones en conjunto como por ejemplo los baffles con sus celosías en paralelo de la sección 3.3 para ayudar a la recolección de lodos, o las cejillas de nivel para controlar la película de aceite-hidrocarburos a recolectar, entre otras.

Por lo tanto, en el canal del separador se instalan los baffles o laberintos mencionados y estos además de hacer el proceso más eficiente facilitando la remoción de lodos del aceite y formación de una capa en la superficie del agua, también poseen la función de seccionar el separador. En la sección 3.5, se enfatizan en los cálculos de diseño del piso del separador para la adecuada remoción de los lodos.

## Capítulo 3

# Diseño del separador

### 3.1. Dimensionamiento del cuerpo principal

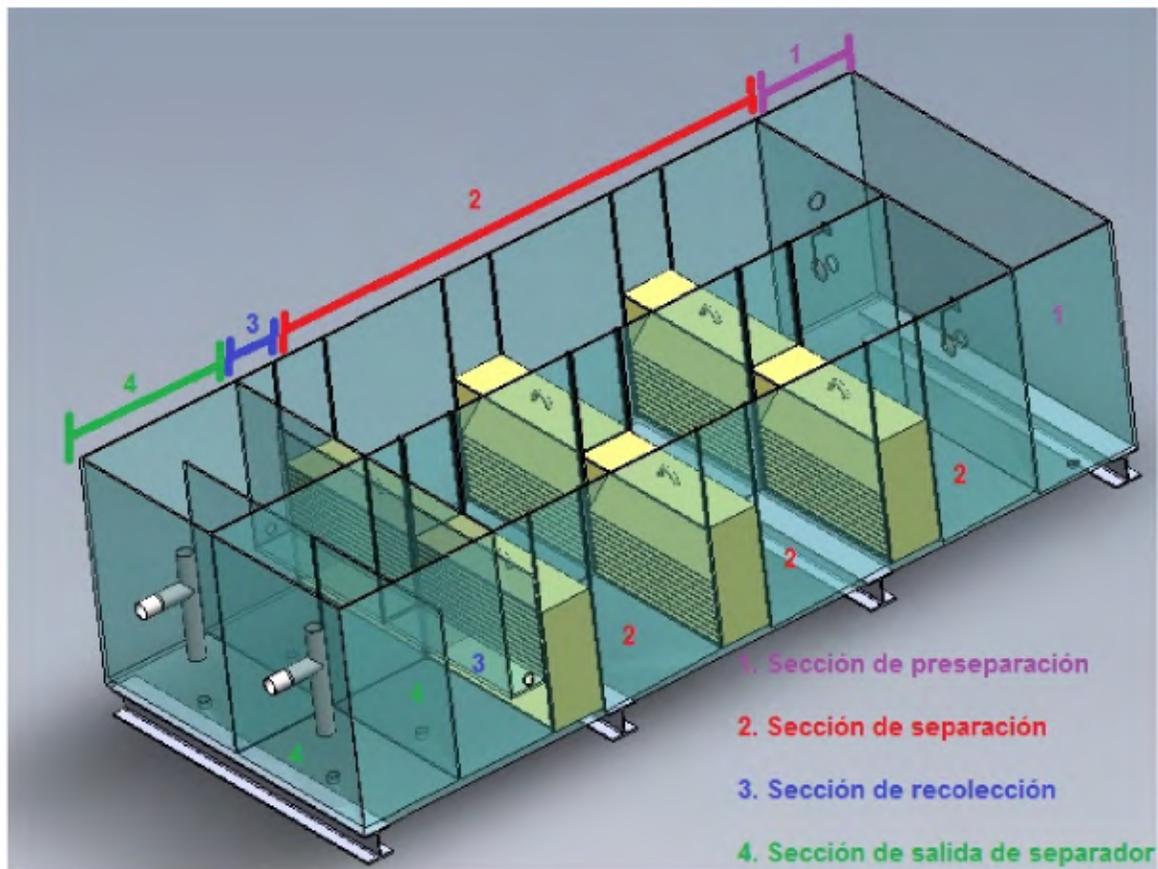


Figura 3.1: Diseño del separador agua-hidrocarburos. Fuente: Elaboración propia (2016)

En lo que respecta al diseño del separador, éste se basará en los parámetros de un C.P elegido solamente como referencia para ejemplificar los cálculos que a lo largo de este capítulo se mostrarán. Cabe destacar que de utilizar parámetros operativos de otro C.P, se variarán los resultados de los cálculos de dimensionamiento pero la funcionalidad de cada componente del separador no se verá afectada

cumpliendo así con lo planteado desde el inicio del proyecto.

Los cálculos de dimensionamiento se basan en función del caudal de entrada, tiempo de separación, temperatura, concentración, gravedad específica del fluido a separar, entre otras variables. En la sección 2.3 se comentaron los distintos tipos de separadores de agua-hidrocarburos existentes, pero para el presente diseño se considerarán todos los tipos mencionados y así orientar el diseño a una combinación de separadores API, PPI y CPI.

Se deben establecer varios criterios de diseño para dimensionar el cuerpo principal del separador, tales como:

- Presión de operación,  $P_o$ ;
- Temperatura de operación,  $T_o$ ;
- Flujo de entrada,  $Q_e$ ;
- Densidad del agua a la temperatura de operación,  $\rho_w @ T_o$ ;
- Densidad de la mezcla de hidrocarburos,  $\rho_o$ ;
- Viscosidad absoluta del agua a la temperatura de operación,  $\mu_w$ ;
- Radio equivalente promedio de las gotas de hidrocarburos,  $r_o$
- Gravedad específica agua,  $S_w$
- Gravedad específica bunker,  $S_o$
- Gravedad,  $g$

Cuadro 3.1: Valores de parámetros de entrada al separador

Parámetro	Valor	Unidades (SI)
Caudal de Entrada, $Q_e$	$1,16 \times 10^{-4}$	$m^3/s$
Temperatura de operación, $T_o$	26,66	$^{\circ}C$
Densidad del agua a la temperatura de operación, $\rho_w @ T_o$	996,54	$kg/m^3$
Densidad de la mezcla de hidrocarburos, $\rho_o$	919,44	$kg/m^3$
Viscosidad absoluta del agua a la temperatura de operación, $\mu_w$	$8,69 \times 10^{-4}$	$N \cdot s/m^2$
Viscosidad cinemática del agua a la temperatura de operación, $\nu_w$	$9,30 \times 10^{-6}$	$m^2/s$
Radio equivalente promedio de las gotas de hidrocarburos, $r_o$	$7,5 \times 10^{-5}$	$m$
Gravedad específica agua, $S_w$	0,99	-
Gravedad específica bunker, $S_o$	0,92	-
Gravedad, $g$	9,81	$m/s^2$
Concentración entrada mezcla hidrocarburos, $C_n$	283	$mg/L$

Del cuadro 3.1, se tienen los parámetros antes mencionados, en donde se debe hacer la aclaración que el caudal de entrada más representativo que se utilizará para el diseño será el del C.P Garabito con un caudal  $Q_e = 10 m^3/dia$  ó  $Q_e = 1,16 \times 10^{-4} m^3/s$ , y también la concentración de hidrocarburos de la mezcla del C.P Garabito es de  $283 mg/L$  como así lo manifestó (Vindas, C. y Rodríguez, D. , Comunicación Personal, 16 junio 2016). Se toma la decisión de calcular las dimensiones del separador con el doble del mismo,  $Q_e = 20 m^3/dia$  ó  $Q_e = 2,31 \times 10^{-4} m^3/s$ .

Por otra parte, cabe destacar que la temperatura de operación de  $T_o = 26,66^\circ C$  es tomada como referencia de dicho centro de producción, ya que esta es la temperatura promedio en la cuál la mezcla agua-hidrocarburos entra al separador. Además que con dicha temperatura se eligen el resto de parámetros de catálogos como la densidad del agua a la temperatura de operación  $\rho_w$ , viscosidad absoluta del agua a la temperatura de operación  $\mu$ , viscosidad cinemática del agua a la temperatura de operación  $\nu$ .

1. *Cálculo de velocidades y relaciones:*

El primer paso para el dimensionamiento del separador es realizar el cálculo de la velocidad ascensional  $V_{as}$ , o la velocidad según la Ley de Stokes tal y como se menciona en la ecuación 2.2 de la sección 2.4.2, se toman en cuenta los parámetros señalados en el cuadro 3.1:

$$V_{as} = \frac{(9,81) \cdot (7,50 \times 10^{-5})^2 \cdot (996,54 - 919,44)}{18 \cdot (0,87)} = 0,0011 \text{ m/s} \quad (3.1)$$

Luego, se procede a calcular la velocidad horizontal  $V_h$  como lo dice la ecuación 2.3 de la sección 2.4.2 obteniendo el resultado:

$$V_h = 15 \cdot V_{as} = 0,016 \text{ m/s} \quad (3.2)$$

Dado que el resultado de velocidad horizontal  $V_h$  anterior es  $V_h \geq 0,015 \text{ m/s}$ , según la norma API se utiliza  $V_h = 0,015 \text{ m/s}$  para los siguientes cálculos. Con los valores de velocidad horizontal  $V_h$  y velocidad ascensional  $V_{as}$  se calcula la relación de la ecuación 2.7 de la sección 2.4.2:

$$\frac{0,016 \text{ m/s}}{0,0011 \text{ m/s}} = 14,01 \quad (3.3)$$

Posteriormente, se calcula el factor de diseño  $F_d$  como se describe en la ecuación 2.8; el factor de cortocircuito  $F_{cc}$  según la norma API 421, se asume siempre como 1,2 y el factor de turbulencia como se explica en la ecuación 2.9 de la sección 2.4.2 :

$$F_T = 0,0228 \cdot 14,011 + 1,014 = 1,356 \quad (3.4)$$

El factor de diseño da como resultado:

$$F_d = 1,356 \cdot 1,2 = 1,627 \quad (3.5)$$

2. *Cálculo de áreas del separador:*

Para el adecuado cálculo de áreas, se debe realizar primero el cálculo del área superficial mínima o llamada también área horizontal  $A_H$ , según la ecuación 2.11 de la sección 2.4.2:

$$A_H = 1,627 \cdot \left( \frac{2,31 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}}{0,0011 \text{ m/s}} \right) = 0,346 \text{ m}^2 \quad (3.6)$$

3. *Dimensionamiento general del separador:*

Una buena elección del tamaño del separador traerá consigo muchos beneficios con respecto a la operación, eficiencia, y también reducción de costos con respecto a los materiales que se utilicen para su construcción. Se iteran (al variar la dimensión de la profundidad) posibles combinaciones de ancho ( $W_c$ ) y profundidad ( $d$ ) que satisfagan el área calculada anteriormente. Se utiliza la ecuación para el área de un rectángulo:  $A_c = W_c \cdot d$ .

Al iterar para el caso modelo del C.P Garabito, se obtienen las combinaciones de  $W_c$  y  $d$  que cumplen o satisfacen una velocidad horizontal de  $0,0152 \text{ m/s}$ , es importante destacar que un área mayor (ya sea porque  $d$ ,  $W_c$ , o ambas sean mayores) no satisfacen la ecuación anterior pero al resultar en un área mayor dan valores de velocidad horizontal menores, lo que beneficia el proceso de separación y por ende la eficiencia debido a que se dá más tiempo a los glóbulos a llegar hasta la superficie al reducir su velocidad horizontal.

En el diseño general del separador, se deben encontrar iterando los valores del largo  $L$ , y ancho  $W_c$  con respecto al caudal de entrada  $Q_e$  de la central de generación eléctrica y a los valores de profundidad neta  $d$  que cumplan con las restricciones ; lo anterior debido a que se tienen varias de combinaciones distintas para encontrar un valor más exacto.

Las restricciones que se deben cumplir de acuerdo a la norma API 421 y normativa de diseño de tanques son:

- Los valores de profundidad neta  $d$  deben encontrarse dentro del rango de  $0,91 \text{ m} - 2,43 \text{ m}$  (3-8 pies)
- La relación profundidad-ancho se debe encontrar entre  $0,3$  y  $0,5$ .
- Debe existir un espacio libre o claro de al menos  $0,3 \text{ m}$  entre la profundidad neta  $d$  ó nivel máximo de la mezcla agua-hidrocarburos y la cubierta del tanque del separador.

Por otra parte, se plantea las siguiente relación (C) utilizando las ecuaciones 2.4, 2.7, 2.11 de la sección 2.4.2, con el fin de variar el largo  $L$ :

$$C = F_d \cdot \left[ \frac{V_h}{V_{as}} \right] \quad (3.7)$$

$F_d$  es el factor de diseño que considera el efecto de la turbulencia en el separador. Este factor se calculo anteriormente en la ecuación 3.5 para calcular el área horizontal requerida y se recuerda que es dependiente de la razón  $V_h/V_{as}$  y se obtuvo de datos experimentales tabulados por la API. La ecuación 3.7 se sustenta en el hecho de que la longitud del separador debe ser suficientemente larga para que los glóbulos en lo más profundo del separador sean capaces de llegar a la superficie si su velocidad ascensional es la calculada anteriormente:  $V_{as}$ .

Las relación de la ecuación 3.7 utiliza los datos o parámetros de entrada al separador como el caudal  $Q_e$ , por ejemplo de la ecuación 2.10 de la sección 2.4.2; se sustituye la relación  $C$  de la ecuación 3.7:

$$L = C \cdot d \quad (3.8)$$

Se obtiene;

$$L = F_d \cdot \frac{V_h}{V_{as}} \cdot d \quad (3.9)$$

Se utiliza la ecuación 3.9 para calcular valor de  $L$  al variar la profundidad del separador. En este punto, el valor de  $V_{as}$  permanece como constante por depender de las características del flujo, asimismo  $V_h$  al ser la velocidad horizontal de diseño que se fijó en  $V_h = 0,01524 \text{ m/s}$ .

Si se sustituyen los valores en la ecuación 3.7. A continuación se demuestra el cálculo para demostrar la razón profundidad-ancho:

$$C = 1,627 \cdot \frac{0,0152 \text{ m/s}}{0,0011 \text{ m/s}} = 22,794 \quad (3.10)$$

A continuación, se sustituye el valor de  $C$  obtenidos de la ecuación 3.10 y junto con un valor de profundidad  $d = 0,995 \text{ m}$  y un valor de  $W_c = 2,000 \text{ m}$  elegido y respetando el rango de (1,8287 - 6,0957)m obtenido de la memoria de cálculo en MS Excel, se obtienen las dimensiones del largo:

$$L = C \cdot d = 22,794 \cdot 0,995 \text{ m} = 22,687 \text{ m} \quad (3.11)$$

Por último, se selecciona la combinación óptima de profundidad  $d$ , ancho  $W_c$  y largo  $L$ . Es importante mencionar que la combinación obtenida daba un ancho muy bajo, de apenas unos centímetros lo cual en la realidad no proveerá un flujo laminar uniforme, por lo cual se decidió aumentarlo a 2,000 m. Al aumentarlo se disminuye la velocidad horizontal, por lo cual no se ve afectado de manera negativa el diseño.

Se verifica que se cumple la razón profundidad-ancho:

$$\frac{d}{W_c} = \frac{0,995 \text{ m}}{2,000 \text{ m}} = 0,498 \quad (3.12)$$

El largo de la ecuación 3.11 se puede reducir ya que ahora se tienen diferentes valores de velocidad horizontal. Al recalcular la ecuación se obtiene un valor muy alto en la relación largo-ancho por lo cual se utiliza un valor de largo  $L$  de 10,00 m y un ancho fijado en  $W_c$  de 2,000 m . Utilizando esos valores en la relación de la ecuación 3.13 se verifica que se cumple la razón largo-ancho ideal:

$$\frac{L}{W_c} = \frac{10 \text{ m}}{2,000 \text{ m}} = 5,000 \quad (3.13)$$

Según la norma API 421 (1990), dado que este diseño contendrá baffles con celosías de desvío, se debe hacer la salvedad que la norma permite reducir el largo  $L$  de la sección de separación hasta 10 veces el valor obtenido, así que se opta por reducir el largo descrito hasta 7,5 veces aproximadamente hasta un valor de 3,025 m.

En resumen, se detalla con el cuadro 3.2, las dimensiones finales del separador para su diseño, en donde cabe destacar que el valor de profundidad neta de la mezcla  $d = 0,995 \text{ m}$  se redondea a 1,000 m y con el que se trabaja en la memoria de cálculo en Excel y se encuentra dentro del rango (de 0,91 m a 2,43 m), además la altura total del tanque  $H_{tot}$  es de 1,3 m contemplando el espacio libre entre la profundidad neta  $d$  y la tapa del tanque de 30 cm, formando una altura total de  $H_{tot}$  de 1,300 m y lo que se desea es encontrar un valor del largo  $L$ , tomando en cuenta que el ancho  $W_c = 2,000 \text{ m}$  es un valor elegido adecuado según la norma API 421.

Los cálculos realizados con las ecuaciones anteriores se muestran en el anexo de la memoria de cálculo iterativa desde la figura 9.42 hasta la figura 9.45, desde la página 128 hasta la página 131.

Cuadro 3.2: Tabla resumen de dimensiones del separador

$C$	22,7937
$d$ , profundidad neta (m)	1,000
$H_{tot}$ , altura total (m)	1,300
$\delta_H$ , diferencia altura total (m)	0,300
$W_c$ , ancho del separador (m)	2,000
$L$ , largo inicial(m)	22,687
$L$ , largo reducido según norma API 421 para sección de separación (m)	3,025
$L$ , largo de la sección de pre separación (m)	0,600
$L$ , largo de la sección de salida (m)	0,600
$L$ , largo final del separador (m)	4,8100
$\frac{d}{W_c}$	0,5

Los planos esquemáticos del separador con las dimensiones del cuadro 3.2 se muestran en el anexo Dibujos y planos esquemáticos del separador a partir de la figura 3.2, en la página 39.

Por otra parte, cabe destacar que el usuario de la memoria de MS Excel puede ingresar distintos valores para el ancho y profundidad pero que siempre y cuando se cumplan con norma API y sus relaciones, además en donde se debe tener en cuenta el caudal de entrada  $Q_e$  que se utiliza para dichos cálculos, y también las propiedades de operación del sistema.

Las vistas superior, lateral derecha, lateral izquierda y frontal del separador se muestran en la figuras 3.2, 3.3, 3.4, 3.5 respectivamente, contemplando los cálculos realizados anteriormente en el desarrollo de la sección 3.1:



Figura 3.2: Vista superior del separador. Fuente: Elaboración propia (2016)

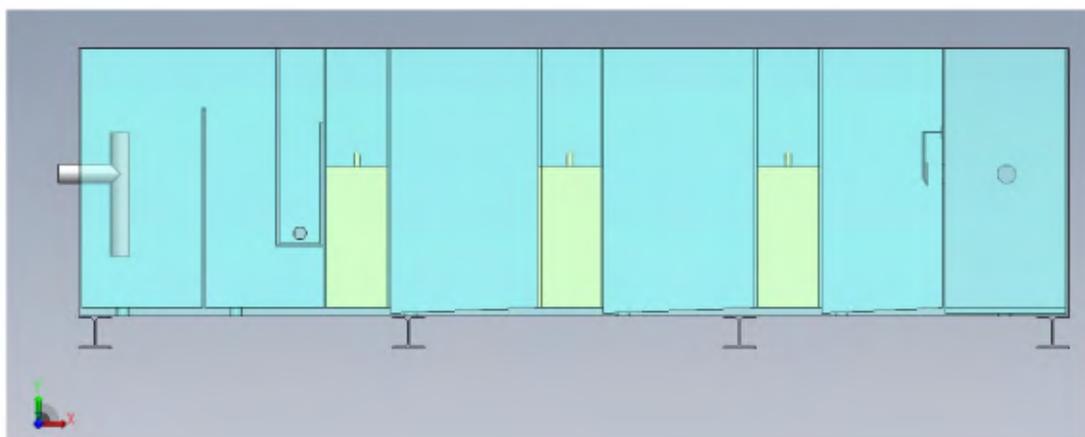


Figura 3.3: Vista lateral derecha del separador. Fuente: Elaboración propia (2016)

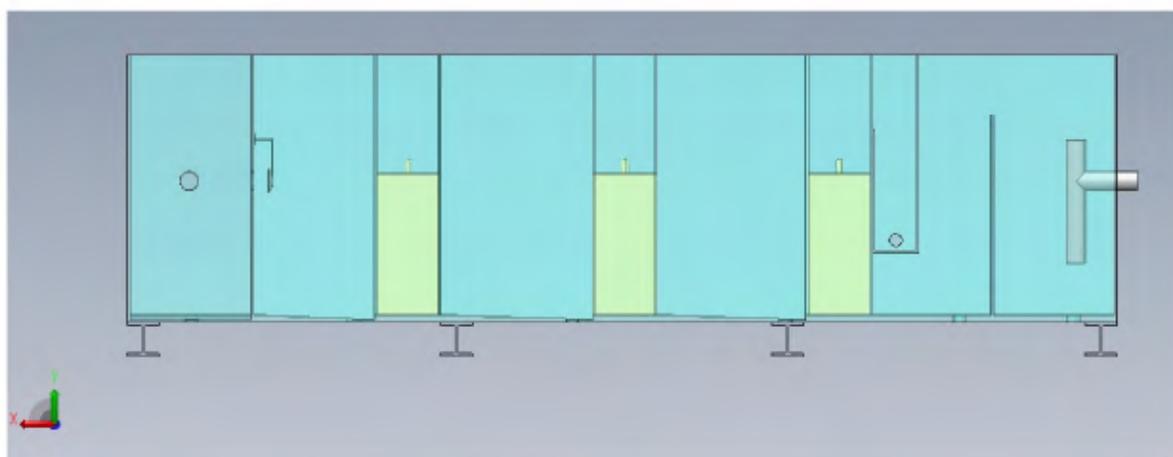


Figura 3.4: Vista lateral izquierda del separador. Fuente: Elaboración propia (2016)

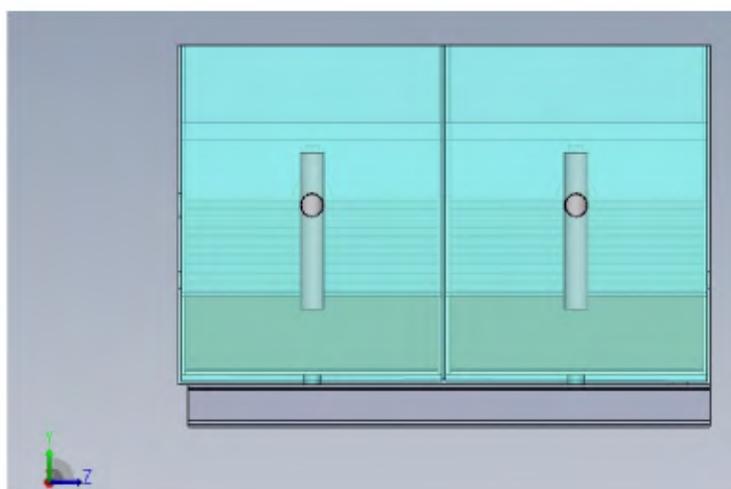


Figura 3.5: Vista frontal del separador. Fuente: Elaboración propia (2016)

4. *Cálculo de volumen total  $V_{tot}$  del separador:*

Tomando en cuenta las dimensiones obtenidas y escritas en el cuadro 3.2, se calcula el volumen total del separador. La ecuación 3.14 ejemplifica el cálculo mencionado:

$$V_{tot} = L \cdot W_c \cdot H_{tot} = 4,8100 \text{ m} \cdot 2,000 \text{ m} \cdot 1,300 \text{ m} = 12,506 \text{ m}^3 \quad (3.14)$$

Con la ecuación 3.14 se muestra la capacidad o volumen total del tanque del separador, con una capacidad de  $V_{tot} = 12,506 \text{ m}^3$  ó (12506 litros).

5. *Cálculo de volumen neto  $V_{neto}$  del separador:*

El volumen neto corresponde al volumen total obtenido luego de restar la diferencia de nivel entre la profundidad neta  $d = 1 \text{ m}$  y la altura total del separador  $H_{tot}$  tomando en cuenta el espacio libre que dicta la norma de diseño de tanques de 30 cm por encima de dicha profundidad neta  $d$  hasta la cubierta del tanque del separador.

Si se tiene un volumen libre dentro del separador de  $V_{libre} = 2,530 \text{ m}^3$ , éste se resta en la ecuación 3.15:

$$V_{neto} = V_{tot} - V_{libre} = 12,506 \text{ m}^3 - 2,530 \text{ m}^3 = 9,976 \text{ m}^3 \quad (3.15)$$

En la ecuación 3.15 se obtiene el resultado del volumen neto con el que podrá trabajar el separador  $V_{neto} = 9,976 \text{ m}^3$  ó (9976 litros).

6. *Cálculo de área superficial del separador  $A_s$ :*

Se representa el cálculo del área superficial del separador para tanques horizontales con la ecuación 3.16:

$$A_{superf} = 2 \cdot [(W_c \cdot L) + (L \cdot H_{tot}) + (H_{tot} \cdot W_c)] \quad (3.16)$$

En donde,  $L$  es el largo,  $W_c$  es el ancho,  $H_{tot}$  es la altura total del separador, valores que se obtuvieron anteriormente del cuadro 3.2 y se obtiene como resultado:

$$A_{superf} = 2 \cdot ((2 \cdot 4,8100) + (4,8100 \cdot 1,300) + (1,300 \cdot 2)) = 36,95 \text{ m}^2 \text{ (397,7 ft}^2\text{)} \quad (3.17)$$

7. *Cálculo de altura  $H_v$  del vertedero de salida:*

Se calcula la altura  $H_v$  del vertedero de salida de la mezcla de agua hidrocarburos, este debe ser siempre menor a la profundidad  $d$  que se obtuvo de 1,0653 m. Se sustituyen los valores de  $Q_e$ ,  $A_c$ ,  $L$  de la ecuación 2.12 y se tiene como resultado:

$$H_v = 1,000 \text{ m} - 0,212 \cdot \left[ \frac{0,00023148 \text{ m}^3/\text{s} \cdot 3,025 \text{ m}}{0,0142 \text{ m}^2} \right]^{\frac{2}{3}} = 0,972 \text{ m} \quad (3.18)$$

Con el valor de  $H_v$  obtenido de 0,9715 m se tiene que es menor a la profundidad neta del separador  $d$  por lo que se cumple con ese criterio según la ecuación de Francis y la norma API 421.

#### 8. Número de canales:

Se elige una configuración que siempre utilice dos canales, es decir, el ancho total del separador se divide a la mitad. Esto permite inhabilitar cualquiera de los dos canales para realizar el debido mantenimiento mientras el otro sigue en operación.

En la figura 3.6, se muestra un dibujo isométrico del cuerpo principal con la precámara y sección de salida del separador:

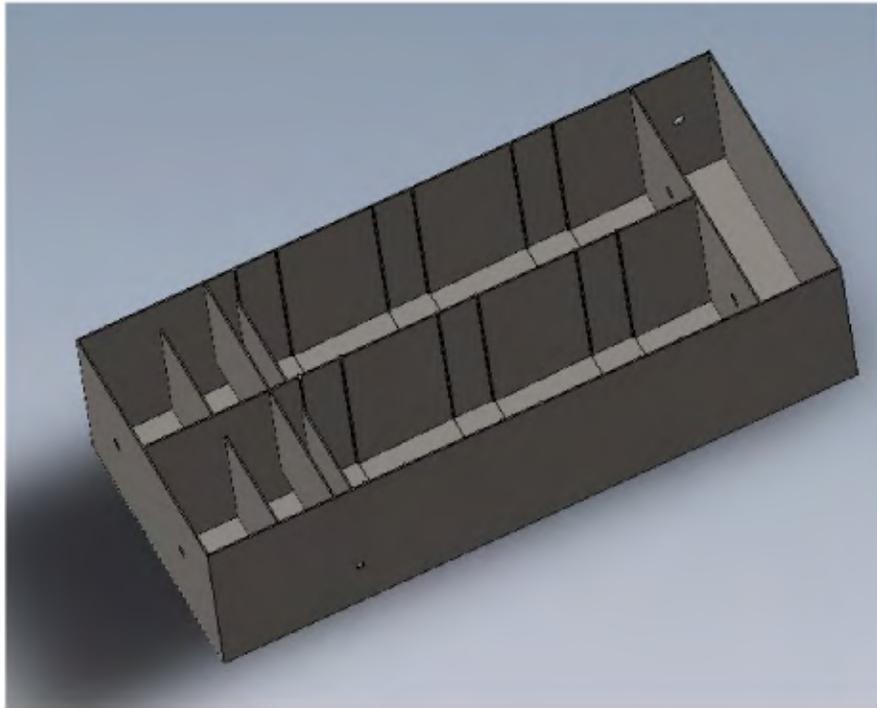


Figura 3.6: Dibujo de cuerpo principal del separador. Fuente: Elaboración propia (2016)

### 3.2. Dimensionamiento de la sección de pre separación

La sección de pre separación recibe el flujo de agua contaminada que viene de los distintos puntos de recolección. Es una expansión de la entrada del separador que cumple la función de estabilizar inicialmente el fluido para reducir su turbulencia y velocidad. También en esta sección se da una separación inicial de los sólidos presentes en el agua, que se asentarán por gravedad en el fondo de dicha cámara hacia la prevista para la purga de dichos sólidos.

Al igual que el resto de las secciones del separador, el piso presenta una inclinación tal y como se explicará en la sección 3.5. Las dimensiones de esta sección no están normadas, por lo que su diseño queda a criterio del diseñador e irá en función de las dimensiones del separador, además dependería del tamaño de las láminas del material a utilizar por conveniencia.

En el diseño planteado, se contempla una pre cámara de 60 cm de largo adicional a la sección de mayor importancia del separador (cuerpo principal) que se evaluó en la sección 3.1. Por otra parte, es pre cámara se diseña siempre de manera rectangular y de manera lineal con el resto de las secciones constructivas diseñadas para el separador.

En el anexo Dibujos y planos esquemáticos del separador, en la figura 9.32 de la página 119, se muestra el isométrico del diseño del separador, con las direcciones de flujo de entrada y salida de la mezcla en el mismo, para mayor comprensión.

### 3.3. Configuración y dimensionamiento de celosías de desvío y baffles

#### 1. Cálculo de celosías de desvío o placas paralelas:

Las celosías de desvío o placas paralelas juegan un papel muy importante en el dimensionamiento de los baffles del separador. El usuario debe seleccionar en función de las dimensiones del separador; un ancho  $W_p$  para las celosías de desvío, un largo  $L_p$ , un espesor  $t_p$ , un ángulo de inclinación de placas  $\theta_p$  y una separación de placas  $S_p$ ; tal y como se muestra en la configuración de la figura 3.7:

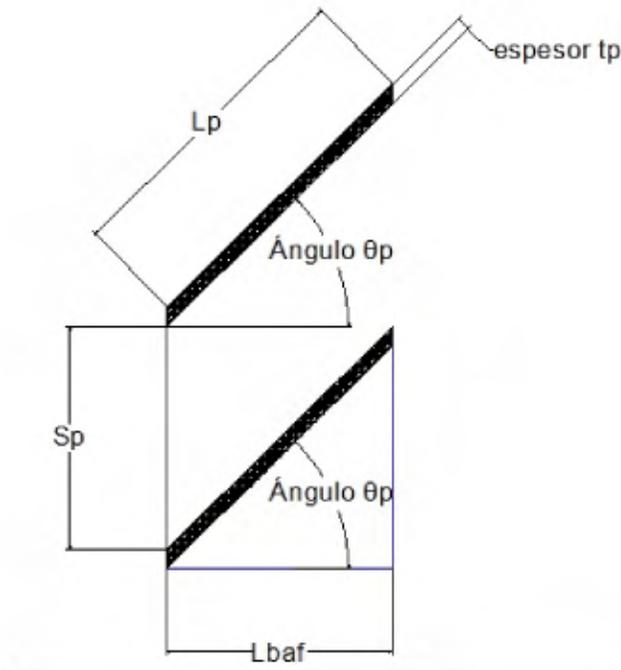


Figura 3.7: Configuración y orientación de placas paralelas. Fuente: Elaboración propia (2016)

Según la norma API 421 [1], estas celosías de desvío o placas paralelas deben cumplir con los rangos descritos en el cuadro 3.3:

Cuadro 3.3: Rangos típicos para el diseño de placas paralelas

VARIABLES	RANGO
Largo de placas paralelas, $L_p$ (m)	depende del largo del canal $L$
Ancho de las placas, $W_p$ (m)	depende del ancho del canal $W_c$
Inclinación de placas, $\theta_p$ (°)	45 - 60
Separación de placas, $S_p$ (m)	0,02 - 0,05

Según lo mostrado en el cuadro 3.3, y tomando en cuenta los valores obtenidos de ancho  $W_c$ , largo  $L$ , y profundidad  $d$  mostrados en el cuadro 3.2 de la sección 3.1; se procede a dimensionar las placas paralelas.

Es necesario calcular la velocidad crítica de sedimentación  $V_{cs}$  de la ecuación la cuál es la velocidad mínima necesaria para que el fluido que atraviesa el separador resuspenda los sólidos depositados en el fondo del tanque del separador.

$$V_{sc} = \left[ \frac{8 \cdot g \cdot \beta \cdot d_o \cdot (S_o - 1)}{F_f} \right]^{0,5} \quad (3.19)$$

En donde;  $g$  es la aceleración gravitacional,  $\beta$  es una constante cuyo valor está en el rango de 0,04 - 0,06 por tratarse de un material no uniforme,  $d_o$  es el diámetro de las gotas de hidrocarburos en  $m$ , y  $F_f$  es el factor de fricción de Weisbach - Darcy, cuyo valor se tomará como 0,03 por tratarse de un flujo laminar esperado. En la ecuación 3.20 se muestra el cálculo de la velocidad crítica de sedimentación:

$$V_{sc} = \left[ \frac{8 \cdot 9,810 \text{ m/s}^2 \cdot 0,06 \cdot 0,000075 \text{ m} \cdot 2 \cdot (0,920 - 1)}{0,03} \right]^{0,5} = 4,650 \text{ m/s} \quad (3.20)$$

Por otra parte, se necesita calcular la velocidad entre placas como parte de la teoría que sustenta el proceso de sedimentación laminar y se basa en la ecuación 3.21:

$$V_p = \frac{L_p + s_p \cdot \tan\theta}{\frac{\alpha \cdot s_p}{V_{sc} \cdot \cos\theta} + \frac{0,058 \cdot s_p^2}{v_w}} \quad (3.21)$$

En donde se tiene, el largo de placas paralelas  $L_p$ , el espesor de placas  $t_p$ , el ancho de las placas  $W_p$ , Inclinación de Placas  $\theta_p$ , la separación de placas  $s_p$ , y la constante  $\alpha$  cuyo valor es 1,3 para el flujo laminar entre las placas. En el cuadro 3.4 se muestran los valores utilizados en las variables de dicha ecuación:

Cuadro 3.4: Medidas finales de placas paralelas

VARIABLES	VALORES
Largo de placas paralelas, $L_p$ (m)	0,320
Espesor de placas, $t_p$ (m)	0,003175
Ancho de la Placa, $W_p$ (m)	0,894
Inclinación de Placas, $\theta_p$ (°)	45
Constante de Régimen Laminar, $\alpha$	1,3
Separación de Placas, $s_p$ (m)	0,05

En la ecuación 3.22 se muestra el cálculo de la velocidad entre placas:

$$V_p = \frac{0,32 \text{ m} + 0,32 \text{ m} \cdot \tan 45^\circ}{\frac{1,3 \cdot 0,05 \text{ m}}{4,650 \text{ m/s} \cdot \cos 45^\circ} + \frac{0,058 \cdot (0,05 \text{ m})^2}{0,0000093 \text{ m}^2/\text{s}}} = 0,0624 \text{ m/s} \quad (3.22)$$

Debido a que para el cálculo de la velocidad de desplazamiento del fluido entre las placas se requiere el uso de una constante, cuyo valor es sólo válido para el caso de flujo laminar, es necesario comprobar que el fluido se encuentre en dicho estado con la ecuación 3.23, por lo cual el número de Reynolds debe estar comprendido entre 300 y 1600.

$$N_r = \frac{V_p \cdot s_p}{\nu_w} \quad (3.23)$$

En la ecuación 3.24 se muestra el cálculo del número de Reynolds:

$$N_r = \frac{0,0624 \text{ m/s} \cdot 0,05 \text{ m}}{0,0000093 \text{ m}^2/\text{s}} = 335,7 \quad (3.24)$$

Se determina el área superficial  $A_s$  de las placas paralelas con la ecuación 3.25 :

$$A_{sp} = L_p \cdot W_p \quad (3.25)$$

En donde se sustituyen valores de largo de placas  $L_p$  y el ancho de placas  $W_p$  y se obtiene como resultado la ecuación 3.26:

$$A_{sp} = 0,32 \text{ m} \cdot 0,894 \text{ m} = 0,286 \text{ m}^2 \quad (3.26)$$

## 2. Cálculo y dimensionamiento de baffles:

El procedimiento para el correcto dimensionamiento de los baffles, va muy relacionado con las dimensiones y configuración y cantidad de placas paralelas por baffle. En la ecuación 3.27 , se demuestra el cálculo para obtener el correspondiente número de placas por baffle:

$$N_p = \frac{A_{sp} \cdot \text{sen} \theta}{W_p \cdot (s_p + t_p)} \quad (3.27)$$

Se sustituyen los valores en la ecuación 3.28, según las dimensiones dadas para las placas paralelas del cuadro 3.4:

$$N_p = \frac{0,286 \text{ m}^2 \cdot \text{sen}45^\circ}{0,894 \text{ m} \cdot (0,05 \text{ m} + 0,0031 \text{ m})} = 11 \text{ placas} \quad (3.28)$$

En lo que respecta al dimensionamiento de los baffles, estos se relacionan con las medidas de separación entre placas paralelas  $S_p$ , el número de placas  $N_p$ , el espesor de placas  $t_p$ , y el ángulo de inclinación  $\theta_p$ , mostrados en la figura 3.7. A continuación se muestra como se calcula el largo del baffle  $L_{baf}$ , mismo que se ejemplifica con las siguiente ecuación 3.29:

$$L_{baf} = \frac{S_p \cdot \text{sen}(180^\circ - 90^\circ - \theta_p)}{\text{sen} \theta_p} \quad (3.29)$$

En donde, si se sustituyen los valores del cuadro 3.4 se obtiene como resultado:

$$L_{baf} = \frac{0,05 \text{ m} \cdot \text{sen}(180^\circ - 90^\circ - 45^\circ)}{\text{sen} 45^\circ} = 0,3046 \text{ m} \quad (3.30)$$

Además, la altura del baffle  $H_{baf}$  está definida por la ecuación 3.31:

$$H_{baf} = N_p \cdot (S_p + t_p \cdot \frac{\text{sen} \theta_p}{\text{sen} 90^\circ}) \quad (3.31)$$

En donde, sustituyendo los valores del cuadro 3.4 se obtiene como resultado:

$$H_{baf} = 10 \cdot (0,05 \text{ m} + 0,0031 \text{ m} \cdot \frac{\text{sen} 45^\circ}{\text{sen} 90^\circ}) = 0,6363 \text{ m} \quad (3.32)$$



Figura 3.8: Baffles con celosías. Fuente: Elaboración propia (2016)

Los cálculos realizados con las ecuaciones anteriores se muestran en el anexo de la memoria de cálculo iterativa en la figura 9.46 en la página 132. Por otra parte, en el anexo de Dibujos y planos esquemáticos del separador se muestran los planos de los baffles en la figura 9.37 en la página 124.

### 3.4. Recolectores

Los recolectores de aceite-hidrocarburos tienen una función fundamental en el proceso de separación, debido a que al formarse la capa de hidrocarburos que se posiciona en la superficie del separador, esta se verterá en los recolectores y a su vez permitirá que el agua continúe con una menor concentración de hidrocarburos hasta su salida.

Los recolectores se posicionan luego de la sección de baffles removibles del separador en cada canal, existe un recolector por cada canal del separador, sus dimensiones van en función del canal, y estas se detallan en el cuadro :

Cuadro 3.5: Dimensiones de recolectores de aceite-hidrocarburos en canales del separador

<b>Largo L (cm)</b>	12,97
<b>Ancho W (cm)</b>	97,95
<b>Alto H (cm)</b>	86,63

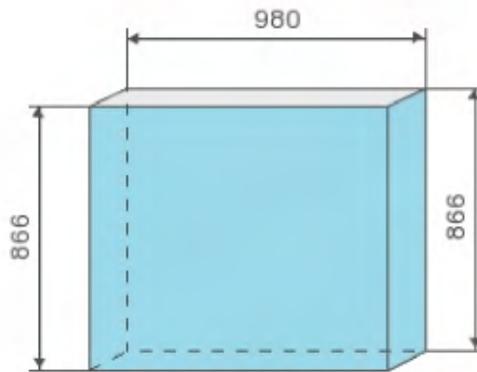


Figura 3.9: Dimensiones de recolectores de aceite-hidrocarburos, cotas en *mm*. Fuente: Elaboración propia (2016)

Dadas las dimensiones de los recolectores de aceite-hidrocarburos en el cuadro 3.5, estas se muestran en el dibujo esquemático de la figura 3.9. Además, se calcula el volumen de cada recolector en la ecuación 3.33:

$$V_{recolector} = L \cdot W \cdot H = 0,866 \text{ m} \cdot 0,9795 \text{ m} \cdot 0,129 \text{ m} = 0,110 \text{ m}^3 \text{ (110 litros)} \quad (3.33)$$

Finalmente, cada recolector tiene la capacidad de recoger 110 litros de aceite-hidrocarburos provenientes del proceso en cuestión.

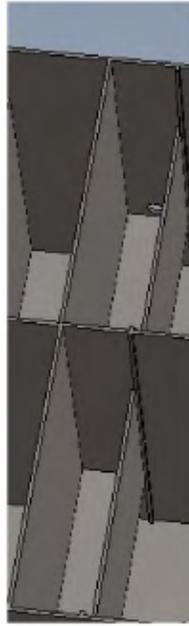


Figura 3.10: Dibujo de recolectores de aceite-hidrocarburos. Fuente: Elaboración propia (2016)

### 3.5. Cálculo de previstas para remoción de los lodos en el separador

En esta sección se explica el cálculo realizado para las pendientes y previstas de remoción de lodos en el piso del separador. Como se mencionó en la sección 2.6, si se toma en cuenta el ancho  $W_c$  y el largo  $L$ , se obtiene la carga de superficie  $s_o$  y esta no tiene una relación con la profundidad neta del separador  $d$ , esto debido a que al inicio no hay diferencia entre un tanque poco profundo o profundo.

Se puede mejorar la eficiencia de un tanque de separación si se construye con un fondo extra o una pendiente adecuada, en este caso de un 2 % de pendiente, para la remoción de lodos, se debe tomar que si se aumenta el área de superficie del tanque, la carga de superficie será menor. La carga de superficie  $s$  debe estar dentro de un rango de (0,1 - 1) m/h y se representa con la siguiente ecuación 3.34:

$$s_o = \frac{Q_e}{W_c \cdot L} \quad (3.34)$$

En donde, sustituyendo los valores mencionados se obtiene como resultado:

$$s_o = \frac{0,833 \text{ m}^3/h}{2 \text{ m} \cdot 3,025 \text{ m}} = 0,138 \text{ m/h} \quad (3.35)$$

De la ecuación 3.35, se cumple que el valor de la carga de superficie  $s_o = 0,138 \text{ m/h}$  se encuentra dentro del rango descrito.

Por otra parte, el tiempo de retención de la mezcla agua-hidrocarburos en la sección de separación del tanque del separador es un valor que se calcula con la siguiente ecuación 3.36:

$$T = \frac{W_c \cdot L \cdot d}{Q_e} \quad (3.36)$$

En donde;  $T$  es el tiempo en horas,  $W_c$  es el ancho del tanque del separador en  $m$ ,  $L$  es el largo de la sección de separación del separador en  $m$ ,  $d$  es la profundidad neta del separador en  $m$ ,  $Q_e$  es el caudal de entrada en el separador en  $m^3/h$ ; y si se sustituyen dichos valores de las variables mencionadas se obtiene el tiempo de retención (de llenado) de la ecuación 3.37:

$$T = \frac{2,000 m \cdot 3,025 m \cdot 1,000 m}{0,833 m^3/h} = 7,26 \text{ horas} \quad (3.37)$$

Tal y como se mencionó que para la ecuación 3.34, ésta no depende de la profundidad neta  $d$ ; pero también se demuestra el valor de la carga de superficie  $s_o$  con la ecuación 3.38 que se convierte es otra alternativa de cálculo esta vez tomando en cuenta la profundidad neta  $d$ :

$$s_o = \frac{d}{T} \quad (3.38)$$

En donde, sustituyendo los valores mencionados se obtiene como resultado:

$$s_o = \frac{1,000 m}{7,260 h} = 0,138 m/h \quad (3.39)$$

Nótese que el resultado de la ecuación 3.39 es el mismo resultado de la ecuación 3.35, cumpliendo con el ámbito descrito de  $(0,1 - 1) m/h$ .

Teniendo como resultado una pendiente de 2%, y sabiendo que la profundidad neta  $d$  es de 1,00  $m$  en el tanque del separador, se tiene que esa pendiente equivaldría a aproximadamente 50  $mm$  más de fondo extra en el tanque.

Dados los cálculos anteriores mostrados en esta sección, se sabe que los lodos se sedimentarán en el fondo de esta cámara, por lo que se plantea que exista una tubería de succión para los lodos depositados por medio de una bomba para cada canal ubicadas a los costados del separador. Además, que al ser dos canales de separación, dependiendo de la demanda (caudal de entrada), trabajarán ambos canales al mismo tiempo o sólo uno, esto se reflejará de manera directa en la operación de las bombas para recolección de lodos de fondo, que se explican en la sección 4.5.

### 3.6. Dimensionamiento de jets en la zona de turbulencia

Como parte del diseño y dimensionamiento de tuberías de entrada y salida, se contempla la subsección del dimensionamiento de los jets en la zona de turbulencia, tal y como se mencionó en la sección 2.5, que cumplen una función de disminuir la turbulencia ocasionada por el caudal de entrada al separador.

El dimensionamiento de los jets va de la mano con la medida nominal de la tubería de entrada, ya que según la norma API 421, los jets o baffles cóncavos tienen un radio de curvatura  $R$  que debe ser igual al diámetro  $d_{opt}$  de la tubería de entrada. Tomando el resultado de la ecuación 4.4 de la medida nominal del diámetro de la tubería de entrada  $d_{opt}$ , se calcula según la norma con la ecuación 3.40:

$$D_{jet} = d_{opt} + 0,0254 \quad (3.40)$$

En donde, se sustituye el valor del diámetro óptimo nominal  $d_{opt}$  en metros y se obtiene como resultado:

$$D_{jet} = 0,07617 m + 0,0254 = 0,1016 m \quad (3.41)$$

Por otra parte, se utiliza el factor de distancia del jet  $F_{jet}$  dentro del rango de 0,25 y 0,6; por lo que se toma 0,6 para los cálculos respectivos. Se multiplica este factor de distancia por el diámetro del jet  $D_{jet}$  para encontrar la distancia del jet  $d_{jet}$  de la pared de entrada así como se plantea en la ecuación 3.42. Según la norma API 421, mantener este factor entre 0,25 y 0,60 asegura que no va a haber congestión a la entrada del canal de separación, pues la distancia es suficiente como para mantener un flujo apropiado y por ende no habrá inundación en la cámara de pre-separación.

$$d_{jet} = D_{jet} \cdot F_{jet} \quad (3.42)$$

Sustituyendo los valores de  $D_{jet}$  y  $F_{jet}$  en la ecuación 3.42, se obtiene como resultado:

$$d_{jet} = 0,1016 \text{ m} \cdot 0,6 = 0,0609 \text{ m} \quad (3.43)$$

Por último, se necesita conocer el tamaño del orificio  $d_{orificio}$  que el jet lleva en su cúpula, la función de este orificio es que el flujo de la mezcla a la entrada no se vea detenido completamente y puede continuar por la sección de separación, pero con un comportamiento más laminar. En la ecuación 3.44 se ejemplifica el cálculo para el diámetro del orificio del jet:

$$d_{orificio} = \sqrt{0,06 \cdot (d_{jet} + 0,0254)^2} \quad (3.44)$$

Sustituyendo el valor de  $d_{jet}$  en la ecuación 3.44, se obtiene como resultado:

$$d_{orificio} = \sqrt{0,06 \cdot (0,0609 \text{ m} + 0,0254)^2} = 0,0249 \text{ m} = 24,9 \text{ mm} \quad (3.45)$$



Figura 3.11: Jet ó deflector cóncavo a la entrada del separador. Fuente: Elaboración propia (2016)

Los cálculos realizados con las ecuaciones anteriores se muestran en el anexo de la memoria de cálculo iterativa en las figuras 9.47 y 9.48, en la página 133.

Por último, para efectos de diseño se coloca un solo jet ó deflector cóncavo en la entrada de cada canal. Si se considera que el perfil de entrada del flujo no es lo suficientemente uniforme, se pueden agregar más jets separados equidistantemente. Debido a que la norma API 421 no emite criterio con respecto a la cantidad de deflectores a utilizar, esta decisión de diseño dependerá de las condiciones de operación específicas y puede ser apoyada por datos experimentales.

En el anexo de Dibujos y planos esquemáticos del separador se muestran los planos de los jets en la figura 9.38 en la página 125.

## Capítulo 4

# Sistemas auxiliares e instrumentación

### 4.1. Calefacción eléctrica

Cuando se tiene la mezcla agua-hidrocarburos dentro del separador, se debe tomar en cuenta que una de las variables significativas en el proceso de separación es la temperatura. Esta variable se analiza en función de la gravedad específica de los hidrocarburos en cuestión y la gravedad específica del agua. Al diseñar el separador para un caso crítico con bunker, se sabe que éste presenta alta viscosidad y se considera un combustible muy pesado.

El control de la temperatura tiene como función principal lograr una velocidad de separación de la mezcla adecuada para convertir dicho proceso en uno más eficaz. Las resistencias de inmersión están diseñadas para el calentamiento en contacto directo con el fluido: agua, aceite, materiales viscosos, disoluciones ácidas o básicas, entre otros.

Puesto que todo el calor se genera dentro del líquido, se alcanza un rendimiento energético máximo. Además, las resistencias de inmersión presentan varias opciones de acoplamiento al depósito o tanque donde se instalan: mediante tapón roscado, con racores, con brida, tipo sumergidores, entre otros. Ver figura 4.1 en la página 52.



Figura 4.1: Resistencias eléctricas. Fuente: EXHEAT (2015)

Según EXHEAT (2015) [11], la calefacción eléctrica de inmersión presenta bastantes ventajas en comparación con otros tipos de calefacción industrial que utilizan combustible o gas, o los intercambiadores de calor indirecto, dentro de las cuales se tienen:

1. *Eficiencia*: la calefacción eléctrica logra prácticamente un 100% de eficacia, dado que casi toda la electricidad es convertida en calor.
2. *Precisión*: la calefacción eléctrica logra un tiempo de reacción veloz, ofreciendo un control superior de la temperatura y la flexibilidad de manejar condiciones de proceso variables.
3. *Ambiental*: sin la producción de agentes de polución como subproductos, la calefacción eléctrica evita las medidas de monitorización y control que son necesarias para cumplir con las reglamentaciones ambientales.
4. *Tamaño físico*: la calefacción eléctrica tiene la ventaja de producir una huella reducida, sin tener la necesidad de tuberías y soportes adicionales, ahorrando de esta forma el invaluable espacio.
5. *Costos*: al tener un tamaño físico más reducido, con la calefacción eléctrica no sólo los costos iniciales son considerablemente menores sino también los costos operativos, al no existir la necesidad de realizar actividades de mantenimiento frecuentes y complejas, y sus tiempos de inactividad asociados o costosas actividades de monitorización.
6. *Mantenimiento*: al utilizarse una cantidad mínima de partes móviles, la calefacción eléctrica requiere menos mantenimiento.
7. *Instalación*: la calefacción eléctrica tiene la ventaja de utilizar medios de operación más simples y plazos de instalación más cortos.

Según la empresa Acim-Jouanin (2016) [15], para la elección de los calefactores eléctricos de inmersión, se eligen del catálogo se toma en cuenta los del tipo atornillados (ver figura 4.2 en la página 53), dada la facilidad de instalación y mantenimiento, además, este tipo de calefactores al ser atornillados, presentan una amplia variedad de tamaños y materiales los cuales tiene entre sus características:

- Calentadores constituídos de alfileres calentadores soldados en una tapa atornillada de latón.
- Fileteado estándar de la tapa según el calentador, gran variedad de tamaños.
- Conexión eléctrica por bornes fileteadas.
- Acoplamiento de los alfileres por pasadores para conexiones en 230 Vac, en mono o trifásico, o 400 Vac trifásico.
- Aparato entregado cableado, con shunts y esquema de cableado.
- Tolerancia sobre potencia: +5% -10%.



Figura 4.2: Atornillados calefactor de inmersión eléctrica. Fuente: Acim-Jouanin (2016)

Es importante mencionar que los calefactores de inmersión o resistencias eléctricas se dejan previstas en este diseño, puesto que son una mejora en caso que el agua a la salida del separador, no cumpla con los parámetros adecuados detallados en el *Reglamento de Vertido y Reuso de Aguas Residuales - Ley N° 33601*, luego de la separación. Además que funcionarían en todo caso para ayudar al proceso de separación, al subir la temperatura de la mezcla se diferenciará más un producto del otro por temas de densidad.

Cabe destacar que este sistema de calefacción eléctrica propuesto, como una mejora contempla la modularidad del diseño del separador en caso de la necesidad de mover el separador a otro lugar; por lo que se dejan de lado otros tipos de calefacción mediante calor de rechazo u otras fuentes; por lo que queda a criterio del usuario el utilizarlas a la hora de la construcción, instalación y puesta en marcha de separador.

Para el cálculo exacto de la capacidad de cada resistencia o calentador de inmersión se evalúa el área superficial de solamente la sección de separación, en donde el área superficial de esta sección es  $A_s = 25,160 \text{ m}^2$  ( $271,896 \text{ ft}^2$ ) y teniendo este valor en cuenta se utiliza el nomograma de la figura 9.17 en la página 107 para la adecuada elección.

Con el nomograma de la figura 9.17 del anexo de Sistemas de calefacción eléctrica en la página 107, se tiene que según el *Reglamento de Vertido y Reuso de Aguas Residuales - Ley N° 33601*, al evaluar con una condición de temperatura máxima de  $40 \text{ °C}$  ( $104 \text{ °F}$ ) (máximo valor permitido por dicha ley), se cruza la línea en el nomograma para calentadores de inmersión inoxidable o contra la corrosión y se obtiene un valor de  $6,5 \text{ W/in}^2$  ( $936 \text{ W/ft}^2$ ).

Dicho valor del nomograma mencionado se multiplica con el área superficial obtenida en la ecuación 3.17 y se obtiene la potencia total para calentar la mezcla de agua-hidrocarburos hasta una temperatura máxima de  $40 \text{ °C}$  como se plantea en este caso. A continuación se ejemplifica dicho cálculo con la ecuación 4.1 :

$$Pot_{calentadores} = 936 \text{ W/ft}^2 \cdot 271,9 \text{ ft}^2 = 254494,7 \text{ W} \text{ (254,5 kW)} \quad (4.1)$$

Con el valor obtenido de  $254,5 \text{ kW}$  en la ecuación 4.1, se analiza dicha potencia y se obtiene que con un número de 6 a 8 calentadores de inmersión con una potencia de  $25 \text{ kW}$  cada una, se puede calentar la mezcla hasta una temperatura máxima de  $40 \text{ °C}$  si se llegase a necesitar. Otras especificaciones importantes de dichos calentadores como una longitud sumergida total (LT) de  $1\ 230 \text{ mm}$ , con alfileres de acero inoxidable 316 L, diámetro de  $13,5 \text{ mm}$ ; se pueden apreciar en la figura 9.18 en la página 108, en donde se encuentra dicha elección de calefactor de inmersión.

## 4.2. Aislamiento térmico

Con la selección de un adecuado aislamiento térmico se tratarán de reducir las pérdidas térmicas asociadas al proceso en cuestión. La reducción del flujo de calor a la temperatura adecuada gracias al aislamiento, provoca un ahorro importante relacionado al costo energético, además que permite un proceso de separación de la mezcla agua-hidrocarburos más eficiente cumpliendo con la legislación actual y posibilita el correcto desarrollo de los diferentes procesos industriales asociados.

Según Isover (2015) [12], los materiales aislantes se presentan en forma de mantas, rollos, coquillas y paneles, eligiendo en cada caso el más idóneo de acuerdo con la temperatura de trabajo y su mejor adaptabilidad para el montaje, en función de las características geométricas y dimensiones de la aplicación a aislar. En la figura 4.3 en la página 55 se muestra un aislamiento alrededor de un cuerpo a cubrir.



Figura 4.3: Aislamiento térmico en la pared de un tanque metálico. Fuente: Isover (2015)

El aislamiento térmico se aplicará en el cuerpo del separador (tanque) ya que según el marco legal-ambiental de la sección 2.4.1, refiriéndose a la *Reglamento de Vertido y Reuso de Aguas Residuales - Ley N° 33601* se debe mantener una temperatura de  $T \leq 40^{\circ}\text{C}$ , en el proceso de separación y a la salida del mismo.

La preparación de la superficie a aislar térmicamente es un tema de bastante importancia ya que este debe estar libre de humedades y de partículas sueltas provenientes del montaje (rebabas, restos de soldadura, tierra, entre otros). En el caso del cuerpo del separador, que será de un material de fácil acceso, versatilidad y buena soldabilidad; es conveniente también hacer que se aplique previamente un tratamiento anticorrosivo adecuado, cuidando especialmente las bridas o zonas donde se prevea una interrupción del aislamiento y haya posibilidad de presencia de agua o humedades.

La adecuada elección de un aislamiento térmico se fundamenta en que el proceso de separación depende estrictamente de la temperatura de la mezcla agua-hidrocarburos, la cuál se debe mantener lo más constante posible según la legislación actual mencionada para así mejorar la eficiencia y reducir la evaporación de la mezcla.

Se indaga en el mercado nacional un tipo de aislamiento que sea accesible, de buen costo, y fácil montaje, entonces se toma la decisión de utilizar ALUBLOCK, como lo describe la empresa Prodex, este es un panel híbrido que tiene un aislante reflectivo combinado con aislamiento de espuma, en una configuración geométrica que permite que el panel limite la conducción, la convección y la radiación [13]. Su presentación es variable en cuanto a espesores y se puede encontrar en el mercado así como se muestra en las figuras 4.4 y 4.5 respectivamente.



Figura 4.4: Aislamiento térmico ALUBLOCK. Fuente: Prodex ALUBLOCK (2016)



Figura 4.5: Aislamiento térmico ALUBLOCK tipo panel. Fuente: Prodex ALUBLOCK (2016)

Además, se puede utilizar en aplicaciones en donde se tenga un rango de temperaturas entre  $-20^{\circ}\text{C}$  a  $80^{\circ}\text{C}$ , también es resistente a la humedad, resistente a la corrosión, y tiene un índice de flama de 0, entre otras características; por lo que se adecúa a las condiciones presentes en el proceso de separación de agua-hidrocarburos de este proyecto. Además que maneja espesores desde 1 pulgada hasta 6 pulgadas. Ver las especificaciones del ALUBLOCK en el anexo Aislamiento térmico en la figura 9.19 y la página 109.

Es de suma importancia destacar que la utilización de un aislante térmico, para efectos de este diseño va relacionado con la ubicación posible del separador, dado que si el mismo se llegase a encontrar en un centro de producción aislado y a la interperie, se decide aplicar el aislamiento térmico alrededor y en la cubierta del separador con el fin de evitar pérdidas asociadas por transferencia de calor que afecten de alguna forma la eficiencia de la separación de la mezcla agua-hidrocarburos.

Por otra parte, si el separador se construye y se instala en un lugar bajo techo, que no esté expuesto totalmente a condiciones ambientales adversas, no es necesario utilizar esta propuesta de aislamiento térmico; sin embargo se plantean ambos casos en cuestión.

### 4.3. Tuberías

En el diseño de un sistema de tuberías se debe incluir el cálculo y elección de tuberías, las empacaduras, válvulas, filtros y demás accesorios requeridos para su instalación. Según Grinnell Corporation (1995) [2], se enlistan los pasos que deben contemplarse para un adecuado dimensionamiento y diseño de tuberías:

- Establecimiento de condiciones de diseño incluyendo la presión, temperaturas y otras condiciones, como velocidad, choques del fluido, ciclos de carga.
- Determinación del diámetro de la tubería, el cuál depende de las condiciones del proceso como el caudal de entrada de la mezcla agua-hidrocarburos, velocidad y la presión de la misma.
- Selección de los materiales de la tubería con base en corrosión, resistencia térmica, costo.
- Selección de las clases de bridas y válvulas (se ampliará en la sección 4.4, de la página 58).
- Realización del cálculo del espesor mínimo de pared (cédula) para las temperaturas y presiones de diseño.

La inversión para la tubería y accesorios en el separador puede constituir una parte importante del diseño, por lo que es importante seleccionar adecuadamente un tamaño de diámetro de tubería de entrada y salida, capaz de trasegar el caudal propuesto para llevar acabo de la mejor manera el proceso en la sección de separación.

Para cualquier conjunto de condiciones de flujo, el uso de un diámetro mayor de la tubería causará un aumento en las cargas fijas para el sistema y una disminución en las cargas de bombeo; por lo tanto debe existir un diámetro económico óptimo de tubería. El valor de este diámetro óptimo puede determinarse combinando principios de la dinámica de fluidos. En las siguientes subsecciones se detalla el cálculo de las dimensiones de las tuberías que se utilizan en el diseño del separador.

#### 4.3.1. Tuberías de entrada y salida del separador

Las tuberías de entrada y salida del separador pueden ser de acero al carbono en cualquiera de las especificaciones ASTM ó API sin costura, aunque también se puede utilizar PVC, siempre indicando los diámetros requeridos. El cálculo de dichas tuberías va relacionado estrictamente por el caudal de demanda de la central de generación eléctrica.

Según la norma API 421 (1990), la velocidad adecuada de entrada al separador  $v_{opt}$  debe estar dentro de un rango de 0,0508 m/s a 0,1016 m/s (10 pies/min a 20 pies/min); por lo que el cálculo del diámetro óptimo se fundamenta utilizando esta velocidad recomendada por dicha norma en el rango descrito.

El cálculo de la tubería de entrada al separador, utiliza el caudal de entrada  $Q_e$ , que tal y como se mencionó en la sección 3.1, se trabaja en este diseño con un valor de  $Q_e = 20 \text{ m}^3/\text{dia}$  ó  $Q_e = 0,00023148 \text{ m}^3/\text{s}$ .

La ecuación 4.2 denota el cálculo de la velocidad óptima de entrada en el separador:

$$v_{opt} = \frac{4 \cdot Q_e}{\pi \cdot (d_{opt})^2} \quad (4.2)$$

A continuación se despeja la variable del diámetro  $d_{opt}$ :

$$d_{opt} = \sqrt{\frac{4 \cdot Q_e}{\pi \cdot v_{opt}}} \quad (4.3)$$

Se sustituye en la ecuación 4.3, el valor menor de velocidad óptima según el rango descrito en la norma API 421,  $v_{opt}$  de 0,0508 m/s y se obtiene:

$$d_{opt} = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,00023148 \text{ m}^3/\text{s}}{\pi \cdot 0,0508 \text{ m/s}}} = 0,07617 \text{ m} (3 \text{ pulgadas}) \quad (4.4)$$

De la ecuación 4.4, se obtiene el resultado de  $d_{opt}$  de 0,07617 m ó (3 pulgadas). Este valor se utilizará en el diseño como tamaño para la tubería de entrada al separador y tubería de salida.

### 4.3.2. Tuberías de extracción de lodos en separador

Según lo explicado en la sección 3.5, al sedimentarse los lodos en el fondo del separador, se toma en cuenta en el diseño las previstas para realizar purgas de fondo mediante bombas para recolección, y dichas previstas estarán en el fondo cada cámara del separador, facilitando el proceso de bombeo hacia un tanque exterior de almacenamiento de lodos.

Estas previstas para las tuberías de recolección de lodos serán de 50 mm (2 pulgadas), ubicadas en el piso de las cámaras del separador, y que estas tuberías se conectarán a las bombas para recolección de lodos, dichas bombas se especifican y caracterizan en la sección 4.5.

## 4.4. Válvulas y accesorios

El transporte de un fluido por medio de tuberías requiere de un adecuado control de flujo, regulación e impedir que este fluido retorne en su sentido de circulación, además, se requiere eliminar alguna sobrepresión que se encuentre por encima de los límites de seguridad.

La correcta elección del tipo y características de la válvula adecuada, es muy importante porque así se esperará la eficiencia de ella en el proceso. Se debe conocer el tipo de fluido, temperatura, la clase y tipo de tubería a instalar, las conexiones y la operación del sistema.

### 1. *Válvula de compuerta a la entrada y salida del separador:*

Se utilizan las válvulas de compuerta cuando sea necesario un caudal de fluido rectilíneo, asimismo como una restricción mínima al paso del mismo, las válvulas de compuerta son de apertura total o cierre total, con un disco que se desliza en ángulos rectos sobre el asiento.

Este tipo de válvulas no permiten utilizarlas en regulación de fluidos; pero si corren de manera directa y en una sola dirección. Además, son utilizadas en servicio general petróleo, gas, aire y líquidos corrosivos, entre otros. Las válvulas de compuerta pueden ser fabricadas en casi cualquier material como en acero al carbón, acero inoxidable, hierro, PVC, CPVC, bronce, acero forjado y con extremos, roscados, bridados.

Las válvulas de compuerta ofrecen una mayor capacidad a diferencia de las demás. Su costo es realmente bajo comparado con todos los beneficios que ofrecen, además que cuentan con un diseño y funcionamiento realmente sencillo.



Figura 4.6: Válvulas de entrada y salida del separador. Fuente: Válvulas y Medidores (2016)

2. *Válvula de purga de lodos en fondo del separador:*

La colocación de válvulas en el fondo para drenar los lodos es de suma importancia, debido a que estos se acumularán debido al proceso de separación agua-hidrocarburos y es necesario extraer dichos lodos para una mejor eficiencia en el proceso. Se plantea la instalación de 3 válvulas en las tuberías de extracción de lodos del separador de cada canal del separador que se explicaron en la sección 4.3, y que estarán conectadas con la bomba de extracción de lodos de fondo que se detalla en la sección 4.8.



Figura 4.7: Válvula de purga de cierre rápido en fondo del separador. Fuente: Válvulas y Medidores (2016)

Estas válvulas de purga deben ser tanto manuales como automáticas, puesto que el separador podrá estar en operación pero si se necesita aplicar el mantenimiento de un canal del mismo o un paro de emergencia, debe estar enlazado con un panel de control para monitorear el proceso de extracción de lodos.

#### 4.5. Bombas para recolección de lodos de fondo

Estas bombas pueden ser de desplazamiento positivo, diafragmas centrífugas, siempre que se garantice una operación adecuada continua y confiable, y puede contar con un accionamiento eléctrico directo. Estas bombas son dos, una para cada canal del separador y están ubicadas a un costado del mismo. Los lodos son bombeados por ellas a un tanque exterior de almacenamiento de lodos.



Figura 4.8: Bomba para recolección de lodos. Fuente: Vican Pumps (2005)

La operación de estas bombas debe ser automática con un sistema de arranque por medio de temporizadores a intervalos regulares y también que cuenten con la opción de operar de forma manual, además que se ajuste a las necesidades del sitio o de demanda del proceso de la central de generación eléctrica. Se recomienda que cuenten con un bloqueo por alto nivel en el tanque de lodos almacenados.

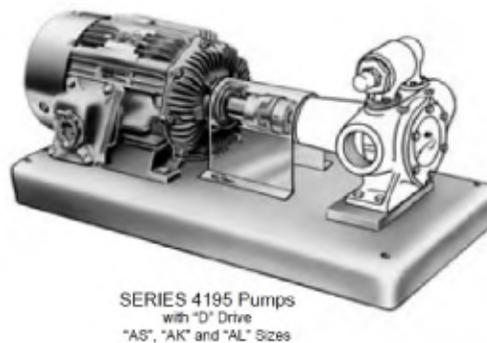


Figura 4.9: Motor de bomba para recolección de lodos. Fuente: Vican Pumps (2005)

A continuación se detallan las características del tipo de bomba elegida para esta aplicación en el separador:

Cuadro 4.1: Especificaciones constructivas de bomba para extracción de lodos

<b>Marca</b>	Vican Pumps
<b>Modelo</b>	AK4195
<b>Material Carcasa</b>	Hierro
<b>Material Rotor</b>	Hierro dúctil
<b>Material Eje del rotor</b>	Acero ASTM 4140
<b>Material de pernos y uniones</b>	Hierro
<b>Material de bujes</b>	Grafito
<b>Tipo de Sellos</b>	Mecánico

Cuadro 4.2: Especificaciones operativas de bomba para extracción de lodos

<b>NPT</b>	2,5 pulgadas
<b>Caudal nominal (<math>m^3/h</math>)</b>	11
<b>Caudal nominal (<math>gpm</math>)</b>	50
<b>Velocidad angular motor (<math>rpm</math>)</b>	1200
<b>Máxima temperatura operación <math>^{\circ}C(^{\circ}F)</math></b>	107 (225)
<b>Potencia Motor <math>kW(HP)</math></b>	2,25 -3,75 (3 - 5)
<b>Tipo de protección NEMA</b>	B

Las especificaciones tanto constructivas y operativas de la bomba de extracción de lodos se muestran en los cuadros resumen 4.1 y 4.2 respectivamente, además que se profundizan dichas especificaciones en el anexo relacionado a las bombas de este tipo a partir de la página 110, así como también se muestra en las figuras 9.22 y 9.23 las curvas de operación de dicha bomba, que se encuentran en las páginas 111 y 112.

Es fundamental anotar que la elección de la bomba de recolección de lodos de fondo va acorde a la demanda mostrada por el caso modelo del C.P Garabito y sus especificaciones son meramente de referencia, pero se enfatiza que la instalación de un separador en otro C.P tomando en cuenta este modelo de bomba variará, dado que los datos de caudal de entrada y salida, concentración de aceite-hidrocarburos serán distintos por lo que se necesitaría evaluar la posibilidad de si este modelo de bomba funcionará de la mejor manera o se necesitará otra de mayor capacidad.

## 4.6. Bombas para recolección de aceite-hidrocarburos

La elección de estas bombas para recolección de hidrocarburos debe fundamentarse dependiendo de la demanda de hidrocarburos en el separador, se extraen alrededor de  $2 m^3/dia$  entre los lodos segmentados y la cantidad de hidrocarburo recolectado en las canoas o recolectores del separador, ya que así lo manifestó mediante una comunicación personal el gestor ambiental de centrales eléctricas del ICE. (Rodríguez, D., Comunicación personal, 16 setiembre 2016).

A continuación se detallan las características del tipo de bomba centrífuga elegida para esta aplicación en el separador:

Cuadro 4.3: Especificaciones constructivas de bomba para extracción de hidrocarburos

<b>Marca</b>	Goulds Pumps
<b>Modelo</b>	3196 t-Frame
<b>Material Carcasa</b>	Hierro dúctil
<b>Material Rotor</b>	Hierro dúctil
<b>Material Sellos carcasa</b>	Fibra de silicato
<b>Material Eje del rotor</b>	ASTM 4140
<b>Material de pernos y uniones</b>	Hierro
<b>Material de bujes</b>	Grafito
<b>Lubricación</b>	Aceite
<b>Tipos de sellos</b>	Mecánicos

Cuadro 4.4: Especificaciones motor de bomba para extracción de hidrocarburos

<b>Potencia Motor <math>kW(HP)</math></b>	1,5 (2)
<b>Número de Fases</b>	3
<b>Frecuencia (<math>Hz</math>)</b>	60
<b>Velocidad angular (<math>rpm</math>)</b>	1750 - 1800
<b>Tipo de protección NEMA</b>	F
<b>Voltaje (<math>V</math>)</b>	460
<b>Factor de servicio (<math>SF</math>)</b>	1,15

Cuadro 4.5: Especificaciones operativas de bomba para extracción de hidrocarburos

<b>Caudal nominal (<math>m^3/h</math>)</b>	8,8
<b>Caudal nominal (<math>gpm</math>)</b>	40
<b>Temperatura operación <math>^{\circ}C(^{\circ}F)</math></b>	21 (70)

Las especificaciones tanto constructivas y operativas de la bomba de extracción de aceite-hidrocarburos se muestran en los cuadros resumen 4.3 y 4.5 respectivamente, además que se profundizan dichas especificaciones en el anexo relacionado a las bombas de este tipo a partir de la página 113, así como también se muestra en las figuras 9.27 y 9.28 las curvas de operación de dicha bomba, que se encuentran en las páginas 114 y 115.

Es fundamental anotar que la elección de la bomba de recolección de aceite-hidrocarburos va acorde a la demanda mostrada por el caso modelo del C.P Garabito y sus especificaciones son meramente de referencia, pero se enfatiza que la instalación de un separador en otro C.P tomando en cuenta este modelo de bomba variará, dado que los datos de caudal de entrada y salida, concentración de aceite-hidrocarburos serán distintos por lo que se necesitaría evaluar la posibilidad de si este modelo de bomba funcionará de la mejor manera o se necesitará otra de mayor capacidad.

## 4.7. Detectores de nivel de agua en separador

Actualmente se utilizan sensores o detectores de nivel de agua del tipo ultrasonido para tanques de hidrocarburos, separadores u otras aplicaciones de refinería y generación eléctrica. Estos detectores

utilizan un micro controlador que está enlazado con un circuito en un panel de control que monitorea todas las actividades del separador mediante un receptor de pulsos.

El pulso del ultrasonido es reflejado al receptor y este lo convierte en una señal eléctrica a un contador de distancia o nivel. El separador cuenta con 2 detectores de nivel de agua, una en cada canal, en la figura 4.10, se ejemplifica el funcionamiento de este detector del tipo ultrasonido:

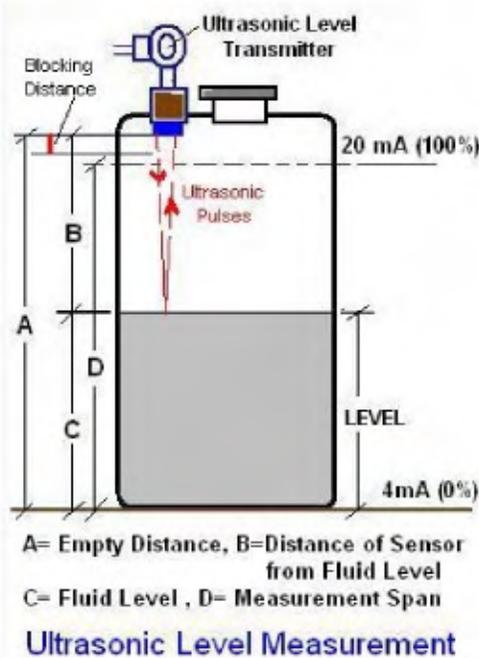


Figura 4.10: Detector ultrasonido de nivel de agua en separador. Fuente: Coulton (2016) [18]

El transmisor se coloca en el punto B de la figura y el punto C es la distancia a medir o nivel de agua en el canal del separador, el tiempo de viaje del pulso del ultrasonido del sensor al nivel es calculado. La relación que utiliza dicho sensor o detector es la siguiente:

$$L_{agua} = \frac{V_{sonido} \cdot t_{retraso}}{2} \quad (4.5)$$

En donde;

$L_{agua}$  es el nivel de agua en el separador en  $m$ ,

$V_{sonido}$  es la velocidad del sonido en  $m/s$ ,

$t_{retraso}$  es el tiempo de retraso entre la distancia y el pulso ultrasónico a entregar al medidor en  $s$

El resultado de dicha medición es entregado en el panel de control de la central de generación eléctrica y se puede dar en centímetros, pies y pulgadas. El detector del tipo ultrasonido elegido para el nivel del agua en cada canal del separador, presenta las siguientes especificaciones:

Cuadro 4.6: Especificaciones detector ultrasonido de nivel de agua en separador. Fuente: Coulton (2016)

<b>Marca</b>	SIEMENS
<b>Modelo</b>	The Probe 10-foot range, 2-Wire, CE Approved 7ML1201-0EF00
<b>Nivel de medición <math>m(pies)</math></b>	0,24 - 5 (0,8 - 16,4) para 2 cables
<b>Condiciones de operación <math>^{\circ}C(^{\circ}F)</math></b>	-40 a 60 (-40 a 140)
<b>Condiciones de operación <math>kPa(psi)</math></b>	100 (14,5)
<b>Voltaje (VDC)</b>	23 - 28 DC
<b>Tipo de protección motor</b>	NEMA 4x tipo 4



Figura 4.11: Detector de nivel de agua SIEMENS The Probe. Fuente: Lesman SIEMENS (2016) [20]

Las dimensiones del detector de nivel de agua en cada canal del separador se detallan en la figura :

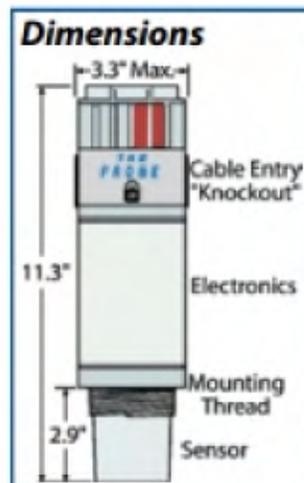


Figura 4.12: Dimensiones detector de nivel de agua SIEMENS The Probe. Fuente: Lesman SIEMENS (2016) [20]

## 4.8. Detectores de nivel de hidrocarburos en recolectores

Según norma EN 858-2:2003 (2003) [4], que explica acerca de la selección del tamaño nominal, instalación y mantenimiento, el separador de hidrocarburos debe incorporar un sistema de aviso automático de alarma que determine el nivel máximo de hidrocarburo acumulado en la canoa por medio de un indicador luminoso y sonoro.

Se llama dispositivo de alarma ACO SECURAT 2001 [5], para instalación en equipos separadores de hidrocarburos, con sondas de nivel de aceites y de nivel de acumulación de agua con caja de protección, este sistema puede traer muchas ventajas como el sensor sumergido que determina el nivel y activa la alarma al máximo nivel y evita el escape de hidrocarburos en la canoa de recolección y permite la evacuación de los hidrocarburos para labores de mantenimiento. Además que manda señal al operador y para que este accione una electroválvula que drene el aceite-hidrocarburo contenido en esa canoa de recolección.



Figura 4.13: Sensor ACO SECURAT 2001. Fuente: ACO SECURAT (2010)

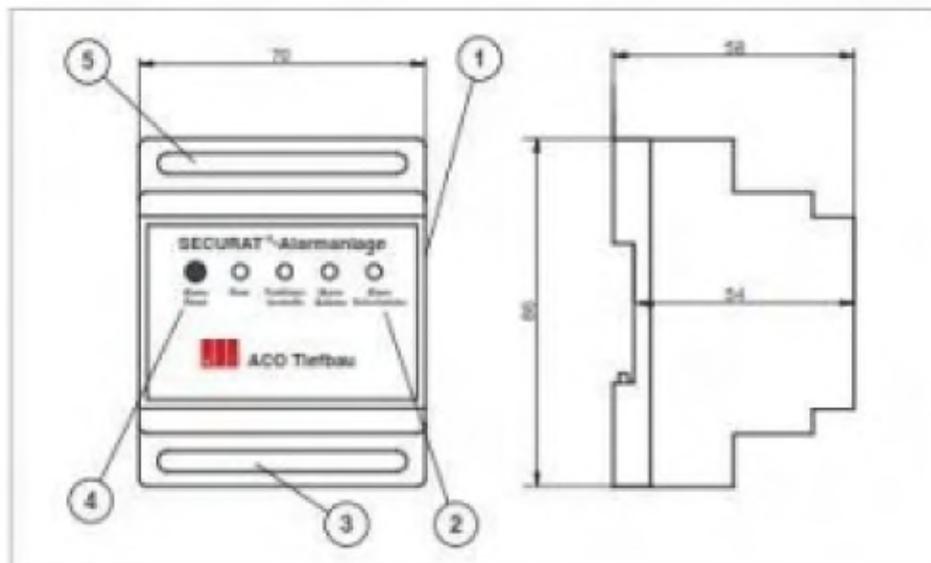


Figura 4.14: Panel sensor ACO SECURAT 2001. Fuente: ACO SECURAT (2010)

De la figura 4.14, se puede observar que los números corresponden a:

1. Switch o conmutador
2. Indicadores luminosos LED's
3. Conexiones de suministros de potencial
4. Botón de reinicio (Reset)
5. Conexiones de Sensores

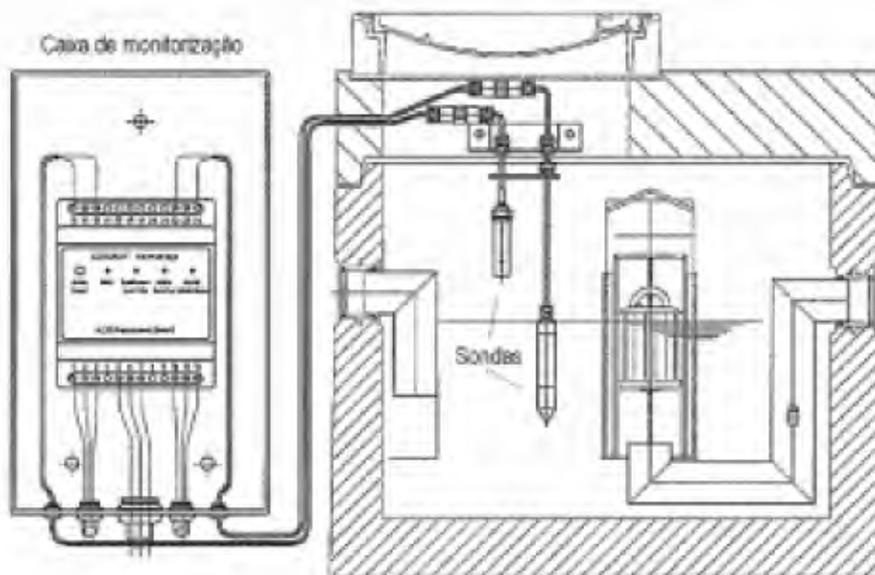


Figura 4.15: Diagrama sensor ACO SECURAT 2001. Fuente: ACO SECURAT (2010)

Las especificaciones de este dispositivo se encuentran en el cuadro 4.7 y se detallan:

Cuadro 4.7: Especificaciones sensor ACO SECURAT 2001. Fuente: ACO SECURAT (2010)

<b>Marca</b>	ACO
<b>Modelo</b>	SECURAT 2001
<b>Alimentación</b>	230 V AC
<b>Condiciones de operación °C(°F)</b>	-20 a 60 (-4 a 140)
<b>Potencia consumo V</b>	6 V
<b>Frecuencia Hz</b>	50 - 60
<b>Corriente A</b>	10
<b>Tipo de protección motor</b>	IP67 Zonas peligrosas (Ex ia)
<b>Peso (kg)</b>	3,3

## Capítulo 5

# Diseño estructural mecánico

### 5.1. Selección de materiales para paredes, piso y cubierta

Para el diseño del separador, se conoce que el Fuel Oil se deriva en 6 tipos (Fuel Oil n°1, n°2, n°3, n°4, n°5, n°6), en donde el bunker es del tipo n°6, lo cual se define como un combustible residual que se obtiene de la destilación y refinación de los hidrocarburos, en donde el crudo se calienta, se gasifica y luego se condensa. El bunker o Fuel Oil n°6, en comparación con otros combustibles y aceites, se considera como uno de los más pesados de alta viscosidad, con relación a los otros tipos de Fuel Oil; es por ello que se ha decidido selección materiales bajo esta condición.

La viscosidad del bunker debe controlarse, ésta debe ser de aproximadamente 300 SSF a 50 °C, así como la ausencia de agua, ya que esta en combinación con el azufre que normalmente viene en el combustible, produce la denominada corrosión en frío la cual se caracteriza con la formación de ácido sulfúrico y sulfhídrico. Por otra parte, muchas veces se realiza un proceso de filtrado de dicho hidrocarburo residual, este tipo de filtrado pretende separar elementos tales como agua, vanadio y sodio que a temperaturas de aprox 700 C produce corrosión en caliente, reaccionando con algunos componentes del sistema, el sílice y el aluminio, así como metales pesados como Cr, Pb, Mb, Mn, entre otros.

Este método de filtrado se puede lograr mediante uso de filtros y bombas centrífugas de purificación que logran que el combustible a utilizar en las centrales de generación eléctrica, sea lo más limpio posible antes del proceso de combustión en las centrales eléctricas, y que al momento de ingresar en el separador, estos no contengan compuestos que aceleren el proceso de corrosión.

La selección de materiales del separador es un aspecto de suma importancia ya que se trabajará con hidrocarburos como el bunker mencionado, por lo que se debe construir dicho separador de un material resistente a cambios de presión, temperatura, de un costo accesible, así como también tomar en cuenta los recubrimientos para las partes susceptibles de corrosión.

Dadas las características anteriores del bunker, se elige el acero ASTM A36 que es el tipo de uso más común en la construcción. Es un acero estructural de buena soldabilidad, adecuado para la fabricación de vigas soldadas para edificios, estructuras remachadas, y atornilladas, bases de columnas, piezas para puentes y depósitos de combustibles. La composición química de dicho acero se basa en valores típicos de porcentajes de carbono  $C \leq 0,26$ , Manganeso Mn ( $\leq 0,80-1,20$ ), Silicio Si ( $\leq 0,40$ ), Fósforo P ( $\leq 0,04$ ), Azufre S ( $\leq 0,05$ ).

Según la normativa ASTM A36 (2014) [9], explicada también en la subsección 2.4.3, sus propiedades permiten que se use el acero en muchas aplicaciones, a diferencia de otras aleaciones de mayor

rendimiento. La selección de este material para las paredes, piso y puertas de cubierta del separador se debe a que es un material de fácil acceso, presentación (laminado), transporte y montaje. Por otra parte, dado que no se trabaja con cambios extremos de temperatura, este material es adecuado para el diseño en cuestión.



Figura 5.1: Láminas Acero ASTM A36. Fuente: Aceros Dume (2016) [14]

Para este proyecto, se elige el material ASTM A36 hierro negro laminado, de dimensiones 1220 x 2440 mm (4 x 8 pies), medida estándar en el mercado nacional por unidad (lámina). En la sección 5.3 del presente capítulo, se profundizará en el cálculo del espesor exacto que se utilizará para el separador. El área de cada lámina se ejemplifica en la siguiente ecuación 5.1:

$$A_{laminas} = 1,22 \text{ m} \cdot 2,44 \text{ m} = 2,9768 \text{ m}^2 \quad (5.1)$$

Cada lámina tiene dimensiones mencionadas de 1220 mm x 2440 mm, y teniendo en cuenta que el área superficial del separador es de  $A_{superf} = 22,149 \text{ m}^2$ , se divide dicho valor entre el área obtenida de la ecuación 5.1 y se obtiene el número de láminas de ASTM A-36 a utilizar para el cuerpo del separador:

$$N_{laminas} = \frac{39,946 \text{ m}^2}{2,9768 \text{ m}^2} = 13,419 \text{ laminas} \quad (5.2)$$

Se necesitarían aproximadamente 14 láminas para la construcción del cuerpo del separador, por otra parte, para la construcción de los baffles y sus celosías, que también estarán contruidos en este material laminado de ASTM A-36, se necesitan al menos 4 láminas más de las mismas dimensiones pero con espesor menor. En total, se contabilizan aproximadamente 18 láminas de ASTM A-36, que los costos de dichas láminas se encuentran en el capítulo de Costos relacionados.

## 5.2. Preparación de superficie y pintura

La corrosión se puede presentar en el separador debido a los componentes químicos de la mezcla agua-hidrocarburo. El nivel de corrosión en el acero depende de las condiciones ambientales además se recomienda que el separador esté bajo techo, para evitar que la velocidad de la corrosión aumenta por estar el separador expuesto. Los efectos de la corrosión se miden por medio del grueso del material que se degrada (milésimos de pulgada), además estas láminas de A36 tendrán un espesor entre 10mm - 15mm.

Para controlar el proceso de corrosión, se debe tomar en cuenta que las pinturas protectoras o anticorrosivas son el método más utilizado para proteger el acero estructural contra corrosión. Se debe utilizar una pintura eficaz y duradera, que resista los efectos del medio, el calor, el impacto a la abrasión y la acción de sustancias químicas; además de una preparación adecuada de la superficie, es necesaria una elección correcta de la pintura, así como una ejecución adecuada de las capas protectoras.

### 5.2.1. Preparación de la superficie

El acero es el material de construcción más ampliamente utilizado en la fabricación de equipos e instalaciones. Los principales contaminantes están representados, además de la grasa, aceite y suciedad, por la escoria y escama de laminación y la herrumbre. Tanto la escoria como las escamas pueden estar firmemente adheridas al acero pero por efectos de dilatación y contracción térmica del material estas impurezas tienden a desprenderse, por lo que cualquier recubrimiento que se aplique sobre ellas pueden sufrir el mismo efecto.

La función primordial de una preparación adecuada de la superficie se basa en eliminar toda suciedad, herrumbre, grasa, aceite o rebabas de laminación que aparecen como consecuencia del proceso de laminación en caliente. Dadas las condiciones del proceso, se presentará abrasión debido a las características de la mezcla agua-hidrocarburos a tratar; dicha mezcla contiene sólidos de un diámetro que se acumularán en el fondo del tanque del separador con una velocidad de sedimentación por lo que, se debe contemplar la abrasión que puede existir en lo interno del separador.

La mezcla agua-hidrocarburos sigue el flujo de entrada y salida, por lo que es importante lograr la máxima adhesión y una opción es utilizar como preparación de superficie un chorro de arena (sand blasting), pero de igual forma se pueden utilizar productos químicos para limpieza del interior del separador. El método de chorro de arena es el método más eficaz en la preparación de superficies de acero, dado que, además de eliminar eficientemente la suciedad, herrumbre, escamas, escoria y otros contaminantes proporciona una superficie áspera de color gris uniforme, excelente para promover una buena adherencia del recubrimiento. Por otra parte, los recubrimientos de uretano, las pinturas de vinilo y los epóxicos tienen una excelente resistencia a la abrasión.

### 5.2.2. Selección del recubrimiento

La selección del recubrimiento interior y exterior depende de condiciones de servicio (producto a almacenar, pH, temperatura, entre otros), el tipo de los recubrimientos usados (tipo de polímero, número de capas, resistencia química, entre otros). Las resinas de mayor uso para la protección de tanques de almacenamiento, interior y exterior respectivamente son los recubrimientos epóxicos.

En este proyecto, se toma en cuenta la resina epoxi que es un recubrimiento sólido, resistente y duro. Se utiliza para múltiples aplicaciones: como recubrimientos protectores, recubrimientos para ambientes marinos, revestimientos para suelos, adhesivos, como compuestos de moldeo, materiales aislantes, plásticos reforzados y productos textiles. Las dos principales resinas epoxi que se utilizan en recubrimientos protectores para ambientes marinos e industriales, se basan en una resina epoxi líquida de bajo peso molecular o en una resina epoxi sólida.

Existen epóxicos con muy alto contenido en sólidos, y epóxicos exentos de disolventes. Un epoxi de alto cuerpo, o de alto contenido en sólidos, es un producto con un contenido en sólidos superior al 40. Los matices de muy alto contenido en sólidos, se utilizan actualmente con frecuencia, en respuesta a normativas nacionales o a posibles problemáticas de tipo medioambiental.

Las características y detalles de la pintura epóxica de dos componentes para combustible a aplicar en el cuerpo del separador, se muestran en los cuadros 5.1 y 5.2:

Cuadro 5.1: Datos técnicos del recubrimiento elegido

Datos técnicos	Características
Marca	Hempel HEMPADUR 15400
Tipo	Epóxica de dos componentes
Densidad	1,4 kg/m <sup>3</sup>
Acabado	Semimate
Rendimiento teórico	6 m <sup>2</sup> /l - 80 micras
Volumen de sólidos en peso	48 %
Secado superficial	1,5 hr
Seco en profundidad	4,5 hr
Curado completo	7 días
Punto de inflamación	110 °C

Cuadro 5.2: Detalles de aplicación del recubrimiento

Detalles de aplicación	Características
Proporción de la mezcla	4:1 volumen
Método de aplicación	Pistola dispersora ó Brocha
Diluyente	5 % de cada uno
Vida de la mezcla (Pistola airless)	2 horas
Vida de la mezcla (Brocha)	4 horas
Boquilla	0,021 pulgadas
Presión	48 %
Espesor recomendado seco	6 m <sup>2</sup> /l - 80 micras
Espesor recomendado húmedo	13 m <sup>2</sup> /l - 175 micras



Figura 5.2: Pintura HEMPEL 15400 para interior y exterior del separador. Fuente: Hempel (2016) [19]

Se elige una pintura con las características adecuadas para su aplicación en el cuerpo interno del separador ya sea mediante brocha o con pistola dispersora sin aire comprimido; esta es la Pintura Hempel 15400 Hempadur - 20 L (5,28344 gal US), especial para interior de tanques y depósitos. La 15400 Hempadur es una pintura epoxi de dos componentes curada con aducto de amina, resistente a productos químicos, además es especialmente indicada para el pintado interior de depósitos que

almacenen productos químicos y combustibles. En el capítulo de Costos relacionados se detalla el precio final de pintar el separador.

### 5.3. Cálculo de esfuerzos en paredes y piso del separador

De la sección 5.1, referente a la selección del material del cuerpo del separador, el acero estructural es un material homogéneo de calidad uniforme que permite soportar grandes esfuerzos, por lo que en la mayoría de los casos se obtienen miembros con espesores relativamente pequeños en comparación con sus otras dimensiones.

Según la norma de AHMSA (2013) [23], utilizada para construcción estas propiedades del acero estructural le dan mayores niveles de seguridad a una estructura sobre todo cuando está sujeta a esfuerzos causados por cargas accidentales, principalmente sismo o viento, ya que estas fuerzas pueden ocasionar inversiones de esfuerzos.

Según la norma API 650 (2013), se procede a calcular primero el espesor de las láminas del tanque (piso y paredes) del separador, la ecuación 2.13 de la subsección 2.4.5 ejemplifica dicho cálculo y se sustituyen los valores obtenidos en el capítulo de Diseño del separador en la sección 3.1, con el cuadro resumen 3.2:

$$t_{laminas} = 2,45 \cdot 119,09 \cdot \sqrt{\frac{0,0025 \cdot 39,2 \cdot 0,036 \cdot 0,992}{36000}} + 0,0625 = 0,54 \text{ pulgadas} \quad (5.3)$$

De la ecuación anterior 5.3, se obtiene un espesor  $t_{laminas} = 13,776$  mm (0,54 pulgadas) para las láminas del piso y paredes; que su resultado se da en pulgadas según la norma API 650 en donde;

$t_{laminas}$  es el espesor de la lámina del material en pulgadas,  
 $L$  es la longitud del tanque en *pulgadas*,  
 $H$  es la altura del tanque del separador en pulgadas,  
 $sg$  es la gravedad específica,  
 $CA$  es el factor de corrección por corrosión,  
 $S_y$  Esfuerzo mínimo permisible en *psi*

Según la norma API 650 (2013), para el acero ASTM A-36 se utiliza un factor de corrección de corrosión  $CA$  de 0,0625 pulgadas para las paredes y 0,0313 pulgadas para el techo del separador.

Para fundamentar la selección del material, se realizó un análisis de elemento finito en el cual se determinaron los desplazamientos y esfuerzos de Von Mises en el cuerpo del separador. Dicho análisis se desarrolló con la herramienta de simulación del software SolidWorks. Para esta simulación, se modelaron las paredes del separador como superficies en vez de sólidos; esto para facilitar de gran manera la solución, ya que tanto para el mallado de componentes tan delgados como para las paredes de media pulgada, se necesitaría demasiado poder computacional, y el software utilizado presenta limitaciones en este sentido.

En la figura 5.3, la deformación en las paredes es la esperada pues hay un mayor desplazamiento en las caras largas que no presentan ningún tipo de soporte estructural. Aún así, el mayor desplazamiento es menor a 3 mm.

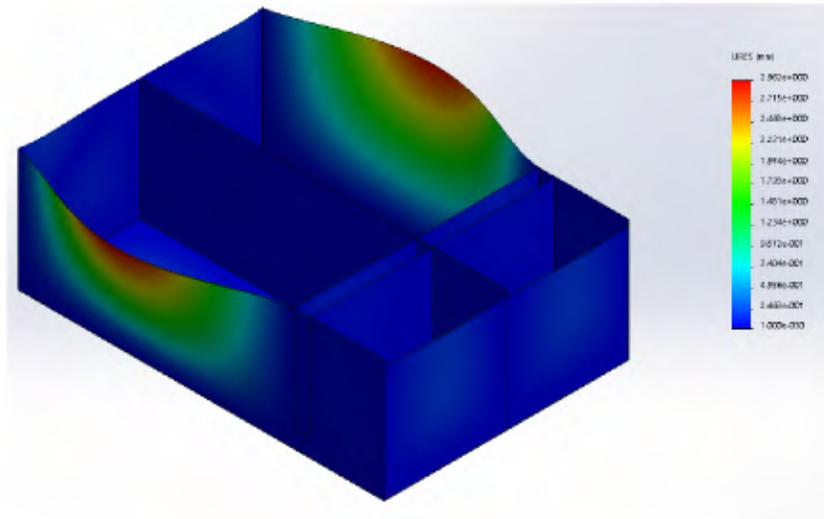


Figura 5.3: Deformación del separador debido a esfuerzos. Fuente: Elaboración propia (2016)

En la figura 5.4, se muestra que la mayor concentración de esfuerzos se encuentra en los puntos donde se tienen las condiciones de que la presión de agua es mayor, las paredes tienen mayor longitud, mayor deformación y existe una unión con los soportes en el piso del separador. El esfuerzo máximo es de 37 MPa, que resulta ser mucho menor al límite elástico del material de 250 MPa, por lo que no se consideran soportes adicionales para atenuar esta concentración. Aún así, se mantiene el espesor seleccionado originalmente, con base en normativa API, y su reducción del espesor no representa una gran diferencia a nivel económico.

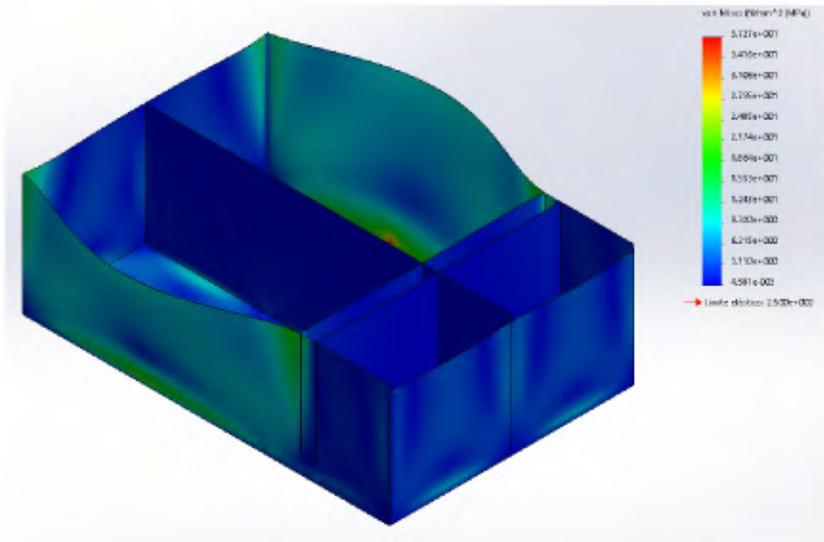


Figura 5.4: Esfuerzos de Von Mises en la estructura del separador. Fuente: Elaboración propia (2016)

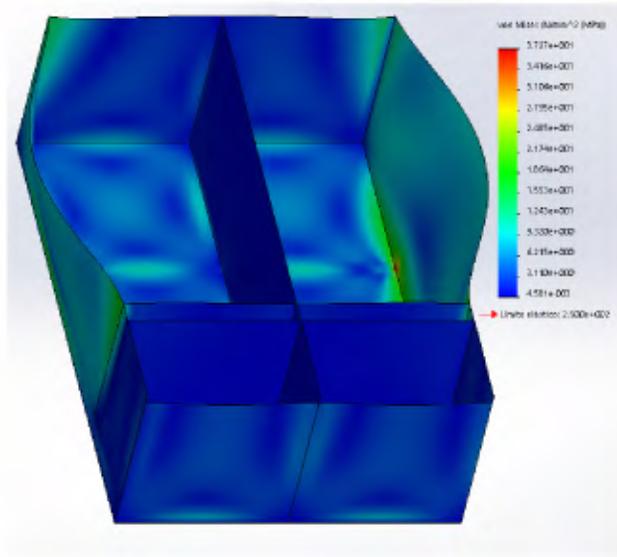


Figura 5.5: Esfuerzos de Von Mises en la estructura del separador, vista alternativa. Fuente: Elaboración propia (2016)

#### 5.4. Determinación de soportes estructurales

Los soportes estructurales del separador son de vital importancia ya que estos deben resistir la carga relacionada con el peso del separador. En primer lugar, se conoce de la sección 5.1 que el material del separador es acero ASTM A-36, por lo que se decide calcular y diseñar los soportes del mismo material. Estos soportes son vigas que se posicionarán en el fondo del separador brindándole estabilidad constructiva al diseño.



Figura 5.6: Vigas de soporte estructural para separador. Fuente: Arcelor Mittal (2016)

Para el cálculo y diseño de los soportes estructurales, se mencionan nuevamente las dimensiones finales calculadas del cuerpo principal del separador de la sección 3.1 y el cuadro 3.2; profundidad neta  $d$  de 1,000  $m$  (39,360 pulgadas), ancho del separador  $W_c$  de 2,000  $m$  (78,720 pulgadas) y el largo final del separador con la pre cámara  $L$  de 4,8100  $m$  (166,35 pulgadas).

Las propiedades del ASTM A-36 presentan como esfuerzo mínimo permisible  $S_y$  de 36 000  $psi$ , por lo que se plantea el diseño de los soportes con 4 vigas repartidas uniformemente por debajo de la sección de separación, por lo que se toma la ecuación 5.4 para el cálculo:

$$s_{viga} = \frac{L}{3} = \frac{189,37 \text{ pulgadas}}{3} = 63,123 \text{ pulgadas} \quad (5.4)$$

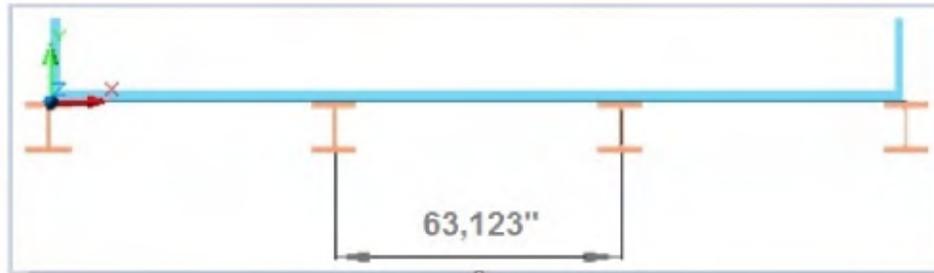


Figura 5.7: Separación entre vigas de soporte estructural. Fuente: Autores (2016)

Para el cálculo del espesor del alma de la viga del soporte  $t_{viga}$  se tiene la siguiente ecuación 5.5:

$$t_{viga} = \frac{s_{viga}}{1,254 \cdot \sqrt{\frac{S_y}{0,036 \cdot sg \cdot d}}} \quad (5.5)$$

En donde,

$t_{viga}$  es el espesor de la viga en pulgadas,

$s_{viga}$  es la separación entre vigas de soporte en pulgadas,

$d$  es la altura del tanque del separador en pulgadas,

$sg$  es la gravedad específica,

$S_y$  Esfuerzo mínimo permisible en *psi*

$$t_{viga} = \frac{63,12 \text{ pulgadas}}{1,254 \cdot \sqrt{\frac{36000 \text{ psi}}{0,036 \cdot 0,992 \cdot 39,36}}} = 0,310 \text{ pulgadas} = 7,870 \text{ mm} \quad (5.6)$$

El espesor mínimo de la viga  $t_{viga}$  se calculó en la ecuación 5.6 y se obtuvo un valor de 5 mm (0,1961 pulgadas), este valor deberá ser mayor que la deflexión de la viga  $\Delta_{viga}$ ; y se realiza un cálculo por deflexión de cada viga debajo del separador con la ecuación 5.7:

$$\Delta_{viga} = \frac{d}{500} = \frac{63,12 \text{ pulgadas}}{500} = 0,1109 \text{ pulgadas} \quad (5.7)$$

El resultado de la ecuación 5.7 cumple con el criterio de que la deflexión  $\Delta_{viga}$  deberá ser menor que el espesor mínimo de la viga  $t_{viga}$ ; además en el anexo de la página 116 de la empresa Arcelor Mittal [16], se muestra el catálogo con el perfil de viga que se utilizará para soportar el separador. Por lo tanto, se elige el perfil 152,4 mm x 37,20 kg/m ó (6 "x 25 lb/pies), de venta comercial en el país.

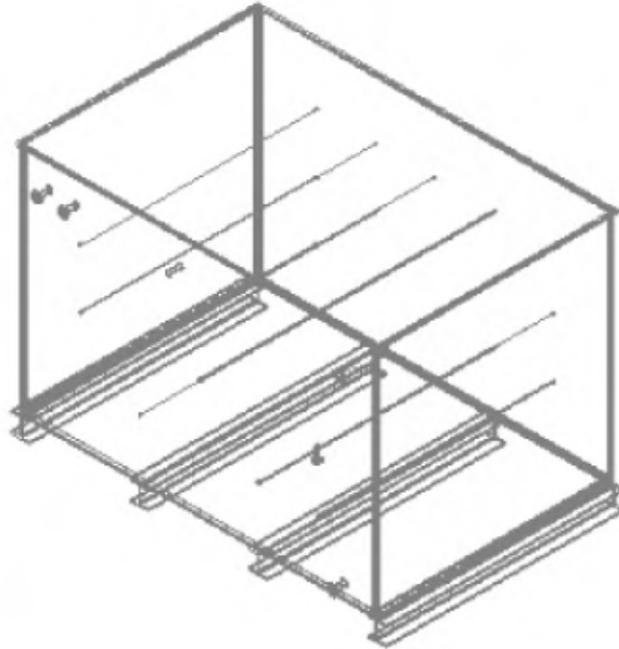


Figura 5.8: Distribución de vigas de soporte estructural para separador. Fuente: Elaboración propia (2016)

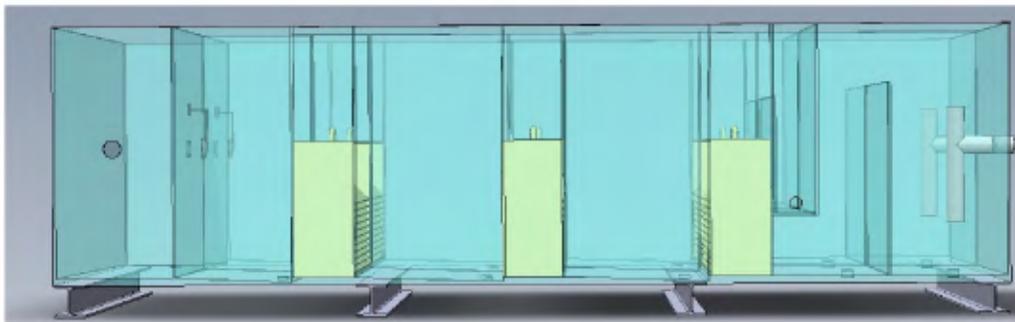


Figura 5.9: Dibujo esquemático de vigas de soporte estructural para separador. Fuente: Elaboración propia (2016)

## 5.5. Selección del tipo de soldaduras

Las dimensiones del tanque de separación halladas en el capítulo de Diseño del separador, sección 3.1, caracterizan al tanque como un tanque de paredes planas, que a pesar de contar con una tapa, no maneja una presión interna y se encuentra a presión atmosférica. La geometría del tipo rectangular de esta sección posee ventajas como aprovechamiento del espacio, rapidez y facilidad de fabricación, además de gran estabilidad.

La norma API 650 (2013), en conjunto con el Código ASME sección IX, hacen referencia a como deben soldarse los materiales que se utilicen, pero también se considera un procedimiento de soldadura de acuerdo a la clasificación de la junta, además que para el proceso de soldadura se debe contar con un soldador debidamente calificado para el trabajo a realizar. En la norma API 650, se habla también

de que luego de la soldadura se debe tener un proceso de inspección y ensayos para verificar la calidad de la soldadura (ensayos no destructivos) para verificar que no exista un riesgo de fugas en el tanque.

La norma recomienda que antes aplicar un procedimiento en específico de soldadura, se debe evaluar si es adecuado para el proceso en cuestión; se debe considerar la temperatura a la que se precalienta el material de aporte y el material a unir. Se recomienda que todas las soldaduras sean aplicadas mediante el tipo de arco eléctrico sumergido, o electrodos recubiertos dado que estos procedimientos pueden ser manuales o automáticos, pero deben ser de penetración completa y siempre se debe eliminar la escoria en el cordón de soldadura antes aplicar el siguiente cordón, independientemente del método manual o automático.

Como se determinó en la sección Cálculo de esfuerzos en paredes y piso del separador, se determinó que la lámina a utilizar es de acero A36 con un espesor nominal de 0.5 in (12.5 mm), con un esfuerzo mínimo a tensión de 450 MPa. De acuerdo a la norma API 650 los materiales con un esfuerzo mínimo a tensión menor a los 550 MPa (80 ksi) deberán utilizar electrodos clase E60 y E70 de acuerdo a la normativa AWS A5.1, conforme a la sección 7.2.1.10.

### 5.5.1. Soldadura en unión pared-fondo

En la unión del fondo con la pared, la norma API 650 establece que para cuando se utilizan espesores de placa inferiores o iguales a los 13,7 mm (0,54 in) sin margen de corrosión (CA), la unión entre el fondo y las placas del cuerpo deberán ser unidas con un filete continuo de soldadura en ambos lados de la placa de pared. El tamaño de cada cordón no será inferior que el espesor nominal de placa a unir 13,7 mm (0,54 in).

En lo que respecta a las placas anulares de un espesor mayor a 12,7 mm, la junta soldada deberá ser una dimensión de manera que la pierna del filete y la profundidad del bisel combinadas sean de un espesor similar a la placa anular.

Para la soldadura en unión pared-fondo, la figura 5.10 ejemplifica los tipos de soldadura posibles en esta subsección:

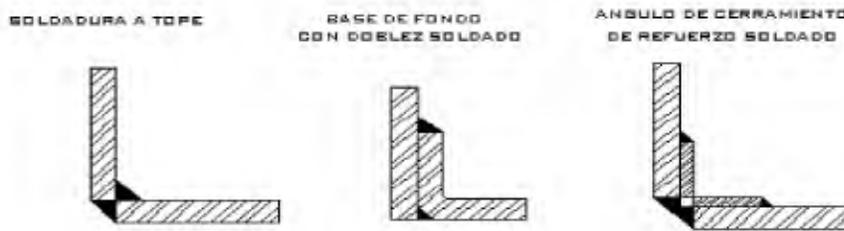


Figura 5.10: Tipos de soldadura para paredes y fondo del separador. Fuente: Molera, P. (1992)

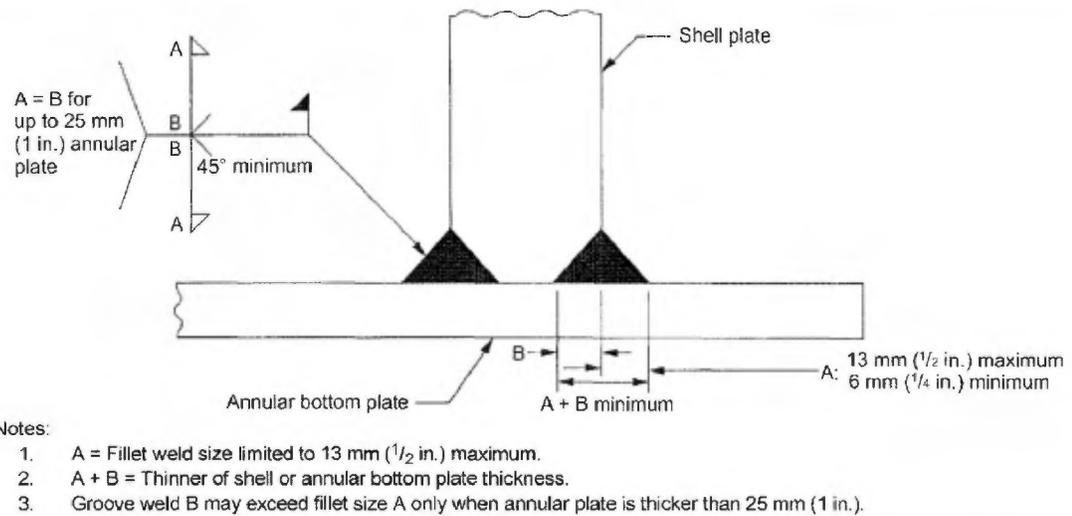
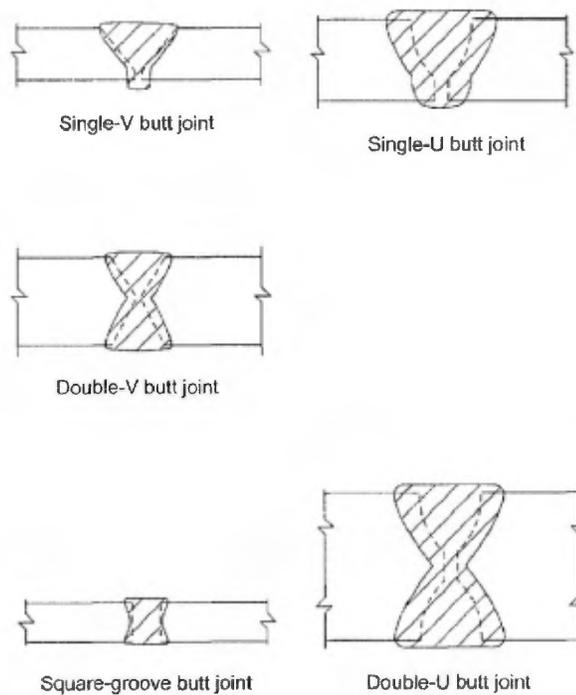


Figure 5-3C—Detail of Double Fillet-Groove Weld for Annular Bottom Plates with a Nominal Thickness Greater Than 13 mm (1/2 in.) (See 5.1.5.7, Item b)

Figura 5.11: Tipos de soldadura vertical para pared-fondo. Fuente: API 650 (2013)

### 5.5.2. Soldadura de paredes

1. *Vertical*: la unión soldada para las láminas de pared verticales debe consistir en una soldadura de tope doble, con penetración y fusión completas. Se deben realizar con doble cordón de soldadura y dentro de los tipos pueden ser: soldadura en V, soldadura en U, soldadura doble V, soldadura doble U y soldadura cuadrada. En la figura 5.12 se muestra dicho tipo de soldadura:

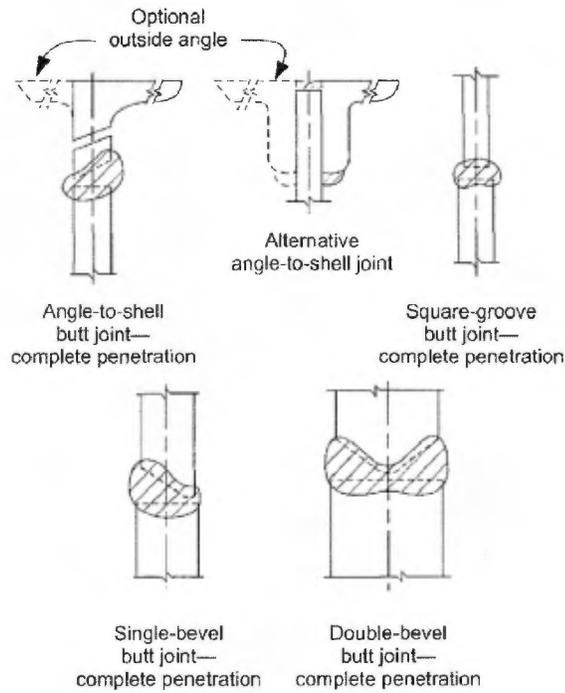


Note: See 5.1.5.2 for specific requirements for vertical shell joints.

Figure 5-1—Typical Vertical Shell Joints

Figura 5.12: Tipos de soldadura vertical para pared. Fuente: API 650 (2013)

2. *Horizontal*: la unión soldada para las láminas de pared horizontales deben tener sus bordes preparados para una soldadura de tope cuadrada o soldadura en V. Deben tener una completa penetración y fusión además de realizarse con un doble cordón de soldadura. Dentro de los tipos se observan: solo un bisel, doble bisel o cuadrada. En la figura 5.13 se muestra dicho tipo de soldadura:



Note: See 5.1.5.3 for specific requirements for horizontal shell joints.

Figure 5-2—Typical Horizontal Shell Joints

Figura 5.13: Tipos de soldadura horizontal para pared. Fuente: API 650 (2013)

### 5.5.3. Soldadura de fondo

La soldadura de fondo debe ser una soldadura de tope y deben prepararse sus bordes para una unión a tope el tipo cuadrado o en V. Se debe alcanzar una penetración completa. En la figura 5.14 se muestra dicho tipo de soldadura:

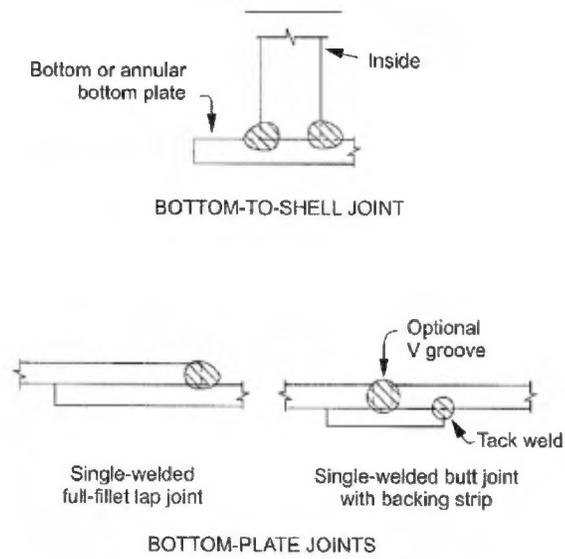


Figura 5.14: Tipos de soldadura para fondo. Fuente: API 650 (2013)

## Capítulo 6

# Mantenimiento y operación

### 6.1. Selección de elevadores para extracción de los laberintos (baffles)

La selección de los elevadores (malacates) para la extracción de los laberintos (baffles) es un tema muy importante debido a que va de la mano con el diseño de los baffles del separador. Los malacates son equipos para la elevación de materiales accionados con motor a gasolina y eléctricas, con capacidades para elevar hasta toneladas.

Según el artículo publicado por Quiminet (2010) [7], un malacate es un equipo de seguridad diseñado para transportar verticalmente materiales u objetos durante una construcción u obras con altura importante, igualmente como para procesos de mantenimiento. Se representan como un gran sistema de cabrestantes, está compuesto por un carrete de acero de gran diámetro, un sistema de freno, una fuente de alimentación y otros dispositivos auxiliares.

Algunos elevadores (malacates) tienen dispositivos de seguridad que permiten el transporte de personas, pero generalmente, son piezas que contiene un tambor donde se enrolla un cable de acero, un embrague, una transmisión y estos son fijados a una superficie, estructura o vehículo. La longitud del cable es esencial, como mínimo debe tener 20 metros, aunque existen malacates con longitudes de 40 metros y 50 metros que son adecuados para aplicaciones mayores.

Según el manual de Autek Maquinaria (2016) [17], diferentes tipos de malacates, pero la decisión se basará en cuanto a la facilidad de montaje, y costo. Los elevadores malacates eléctricos tipo Pluma 500 kg 30 metros incluyen trípode en estructura para anclaje botonera y gancho de sujeción. El elevador es de rápida y fácil instalación que puede trabajar desde cualquier punto de la obra. Su cabezal giratorio de 360° así como se observa en la figura 6.1 es ideal para cargar y descargar materiales. Ligero versátil y fácil cambio de adaptación.



Figura 6.1: Malacate eléctrico tipo Pluma. Fuente: Autek Maquinaria (2016)

Ver figura 9.30 en la página 117 del anexo respectivo, para las especificaciones de dicho malacate.

Por otra parte existen los malacates tipo Polipasto que se pueden colocar en cualquier viga con fijación transversal. Esencialmente su uso se enmarca en construcción de obras o zonas terminadas donde no se requiera el giro del material es decir únicamente la elevación carga y descarga de material u objetos para determinadas zonas, ya que estos malacates no giran si no que se colocan fijos sobre una estructura. Ver figura 6.2 en la página 83.



Figura 6.2: Malacate eléctrico tipo Polipasto. Fuente: Autek Maquinaria (2016)

Ver figura 9.31 en la página 118 del anexo respectivo, para las especificaciones de dicho elevador (malacate).

La decisión en la selección del malacate para la extracción de los baffles o laberintos, se basa fundamentalmente en la versatilidad y montaje de dicho sistema, por lo que optar por un malacate eléctrico del tipo Polipasto con ganchos, a pesar que se puede instalar en cualquier viga o estructura fija encima de donde se encuentre el separador, se tendrían que hacer cálculos de fuerzas para ver si efectivamente la viga o estructura mencionada pueda soportar el malacate tipo Polipasto con ganchos para la extracción de baffles.

Por lo tanto, se decide elegir el malacate eléctrico tipo Pluma ya que a pesar que es un mecanismo más complejo y de mayor tamaño, éste se puede armar y desarmar cerca del separador para proceder a la extracción sin necesidad de instalarlo en una estructura fija, además que se tienen más grados de libertad de movimiento como un giro en 360°, lo que hace que sea más versátil para el proceso de mantenimiento del separador.

## **6.2. Protocolo general de mantenimiento**

El mantenimiento del separador de agua-hidrocarburos se debe realizar con dos limpiezas anuales, una parcial y una general; además de la recolección de los lodos que se sedimentan en el fondo del separador. Dicho mantenimiento evita que el separador se desgaste demasiado debido a la gran cantidad de suciedad que está presente en el proceso, y por ende se disminuya la eficiencia de operación debido a ello. A continuación se ejemplifican una serie de pasos para cada procedimiento y de como se deben aplicar:

### **6.2.1. Limpieza parcial**

1. Se debe cortar el suministro de energía a los controles electrónicos de la trampa para iniciar la limpieza.
2. Cerrar la válvula de entrada al separador.
3. Retirar las tapas o cubiertas superiores del separador para tener control del trabajo de limpieza a realizar.
4. Retirar natas u otros remanentes en la superficie del separador.
5. Se procede a reducir el nivel del agua del separador con una purga de fondo, para la limpieza correspondiente a los lodos.
6. Limpiar la bandeja de vertido del separador.
7. Limpiar la precámara de separación que antecede la entrada al separador.
8. Llenar nuevamente el separador hasta el nivel inicial de agua.
9. Abrir válvula de entrada al separador.
10. Energizar los tableros de control nuevamente.

### **6.2.2. Limpieza general**

1. Se debe cortar el suministro de energía a los controles electrónicos de la trampa para iniciar la limpieza.
2. Cerrar la válvula de retención de entrada al separador.
3. Retirar las tapas o cubiertas superiores del separador para tener control del trabajo de limpieza a realizar.

4. Se procede a reducir el nivel del agua del separador con una purga de fondo, para la limpieza correspondiente a los lodos.
5. Evitar vertir agua que contenga residuos visibles de hidrocarburos, dicho hidrocarburos se encuentran en la superficie del agua del separador. Si a la salida del separador se vierte agua con algún residuo visible de hidrocarburo, inmediatamente suspender el proceso cerrando la válvula de retención de bola a la salida.
6. Abrir todas las válvulas de purga de fondo del separador para el correcto drenaje de los lodos del separador.
7. Extraer cada bafle del separador para su profunda limpieza fuera del separador.
8. Extraer las placas paralelas de los baffles para la limpieza adecuada de los sedimentos adheridos en paredes y superficie de dichas placas. Se recomienda el uso de vapor de agua a presión para eliminar cualquier residuo.
9. Colocar cada placa paralela dentro de los baffles.
10. Limpiar con vapor de agua a presión, cada cámara del tanque del separador para asegurar un adecuado funcionamiento del sistema.
11. Colocar cada bafle limpio de nuevo en el separador con el malacate.
12. Cerrar válvulas de drenaje de lodos y purga del separador.
13. Chequear todos los calentadores eléctricos con frecuencia buscando acumulación de lodo y se encuentra, deberá limpiarse con vapor de agua.
14. Proceder al llenado del separador con agua limpia hasta un nivel de 5 cm a 10 cm debajo de la bandeja de vertido.
15. Abrir válvula de compuerta a la entrada del separador.
16. Colocar las tapas o cubiertas superiores del separador.
17. Energizar los tableros de control nuevamente.

### **6.3. Guía de operación**

En lo que respecta a la operación del separador diseñado, se contemplarán los residuos de aguas residuales, aguas "llovidas", residuos de hidrocarburo producidos por las fugas a la hora del llenado de los tanques de combustible en las plantas, drenajes de las casas de máquinas, residuos de las pilas de lavado, entre otros; los cuáles como se ha explicado anteriormente son llevados al separador para el proceso descrito; por lo que se deben tomar las siguientes recomendaciones para su operación:

#### **6.3.1. Puesta en marcha del separador**

1. Revisar que todas las válvulas de purga o drenaje de fondo estén cerradas.
2. Verificar que válvula de retención de entrada de aguas residuales y válvulas de salida de aguas tratadas estén abiertas.
3. Chequear el nivel del agua limpia, que esté a un nivel máximo entre 5cm a 10cm libres por debajo del nivel de la bandeja de vertido para que se realice de la mejor manera el proceso.

### 6.3.2. Operación manual del separador

La operación manual del separador se realiza cuando se necesite trasegar aguas residuales provenientes de los diques de contención de los tanques, pilas de lavado de instrumentos y herramientas, así como también fugas que se produzcan a la hora de carga y descarga de combustible mediante camiones cisterna en las centrales de generación eléctrica, entre otros.

1. Chequear el nivel de hidrocarburo que está contenido en el tanque de recolección para verificar si es él idóneo para operar el separador, de lo contrario se debe vaciar el mismo y proceder con el proceso.
2. Verificar que el tablero de operación en la planta esté en modo Manual.
3. Abrir válvula de paso que comunica tubería de entrada al separador, y trasegar la mezcla agua-hidrocarburos recolectada.
4. Cerrar otras válvulas que ingresan en el cabezal del separador.
5. Verificar que el trasiego de la mezcla a separar se dé de manera adecuada, se debe realizar en sitio del separador.
6. Revisar que el funcionamiento del separador tanto a la entrada como a la salida sea el adecuado.
7. Observar el nivel del tanque de recolección de lodos.
8. Cerrar la válvula de paso de tubería que trasiega la mezcla al separador, en el punto de trabajo.

### 6.3.3. Operación automática del separador

La operación automática del separador se deberá contemplar solo cuando eentran en operación las centrífugas de extracción de lodos en las centrales eléctricas, por lo que se deben seguir los siguientes pasos:

1. Chequear el nivel de hidrocarburo que está contenido en el tanque de recolección para verificar si es él idóneo para operar el separador, de lo contrario se debe vaciar el mismo y proceder con el proceso.
2. Verificar que el tablero de operación en la planta esté en modo Automática.
3. Revisar que la válvula en la tubería de salida de la bomba de lodos esté abierta.
4. Cerrar otras válvulas que ingresan en el cabezal del separador.
5. Cotejar el nivel de agua residual en el separador, luego que la bomba de extracción de lodos termina su proceso,
6. Revisar el caudal de entrada y caudal de salida del separador, así como también el nivel del tanque de recolección.

## 6.4. Operación de calentadores de inmersión

Según la empresa Process Technology (2010) [6], se enumeran los cuidados básicos para la operación adecuada de calentadores de inmersión mencionados en la sección 4.1:

1. Verificar que el voltaje lineal concuerda con el voltaje requerido según lo indicado en la placa de identificación.
2. Contactar con el proveedor de electricidad que se dé un servicio eléctrico de tamaño adecuado (se provee un sistema de desconexión a base de fusibles o caja de fusibles de capacidad suficiente.

3. Ver que el material cobertor de calentamiento de la resistencia es compatible con la solución que ha de calentarse.
4. Comprobar que el tanque está equipado con un dispositivo que desconecta cuando baja el nivel del líquido, (sensor de nivel de agua).
5. Instalar un medidor para controlar temperatura (termostato) de tamaño adecuado.
6. El termostato debe contener sistemas de circuitos requeridos para incluir el sistema protector de exceso de temperatura así como el sistema de desconexión controlado por niveles líquidos cuando rebasan niveles mínimos aceptables.
7. Enchufar solo después de que la mezcla en el separador cubra las resistencias.
8. Evitar enchufar sin presencia de mezcla de agua-hidrocarburos.
9. Asegurarse de que los circuitos no estén inmersos en el lodo o sedimentos del fondo del separador.

## Capítulo 7

# Costos relacionados

En este capítulo se detallan los costos relacionados del separador, incluyendo los sistemas auxiliares (bombas, tuberías y accesorios), el material utilizado para su fabricación, aislamiento térmicos, recubrimientos, entre otros. Cabe destacar que estos costos son solo de referencia para este diseño, por lo tanto solo serán costos unitarios y variarán dependiendo de la demanda de proceso (caudal) de la central de generación eléctrica, así como también del producto a separar, la ubicación geográfica de la central, entre otros. Dado que es solo un diseño parametrizado, el usuario deberá evaluar dichas variaciones para realizar la mejor selección tanto del material, como equipo y demás sistemas auxiliares.

A continuación se muestran los cuadros resumen de todo los componentes asociados al separador:

Cuadro 7.1: Costos relacionados de bombas de recolección

<b>Componente</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Precio colones (c)</b>	<b>Precio dolares (\$)</b>
Bomba de recolección de lodos de fondo	1	3 091 200	5 520
Bomba de recolección de aceite-hidrocarburos	1	2 570 400	4 590
<b>Total</b>		5 661 600	10 110

Cuadro 7.2: Costos relacionados de detectores de nivel

<b>Componente</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Precio colones (c)</b>	<b>Precio dolares (\$)</b>
Detector de nivel de agua	1	196 000	350
Detector de nivel de hidrocarburos	1	328 160	586
<b>Total</b>		524 160	936

Cuadro 7.3: Costos relacionados de tuberías, válvulas y accesorios

Componente	Cantidad	Precio colones(c)	Precio dolares (\$)
PVC Tubo sanitario SDR-41 2"50 mm x metro lineal	ML <sup>1</sup>	1 800	3,21
PVC Tubo sanitario SDR-41 3"75 mm x metro lineal	ML	2 800	5
PVC Flanger válvula compuerta SCH-80 75 mm 3"	1	9 710	17,34
Válvula de cierre rápido 50 mm	1	16 720	29,85
PVC Unión de tope SCH-40 50 mm	1	8 020	14,32
PVC Unión de tope SCH-40 75 mm	1	19 070	34,05
PVC Tee sanitaria 50 mm	1	980	1,75
PVC Tee sanitaria 75 mm	1	3 176	5,67
PVC Codo sanitario 50 mm x 90°	1	687	1,22
PVC Codo sanitario 75 mm x 90°	1	1 800	3,21
<b>Total</b>		<b>64 763</b>	<b>116</b>

Cuadro 7.4: Costos relacionados de materiales de fabricación y recubrimiento

Componente	Cantidad	Precio colones(c)	Precio dolares (\$)
Lámina ASTM A-36 - 1220 mm x 2440 mm	1	130 000	232
Perfil viga 305 mm x 21,1 kg/m ó (12 "x 14 lb/pies)	1	100 000	180
Recubrimiento epóxico Hempel 15 400	1	60 000	125
<b>Total</b>		<b>300 000</b>	<b>536</b>

Cuadro 7.5: Costos relacionados de elevadores, aislamiento térmicos, resistencias

Componente	Cantidad	Precio colones(c)	Precio dolares (\$)
Elevador para extracción de bafles	1	300 000	536
Aislamiento térmico ALUBLOCK x metro lineal	ML	15 000	27
Resistencias térmicas	1	20 000	36
<b>Total</b>		<b>335 000</b>	<b>599</b>

Cuadro 7.6: Costos relacionados totales del separador

Costo total relacionado	Precio colones(c)	Precio dolares (\$)
Bombas de recolección	5 661 600	10 110
Detectores de nivel	524 160	936
Tuberías, válvulas y accesorios	64 763	116
Materiales y recubrimiento	300 000	536
Elevadores, aislamiento, resistencias	335 000	599
<b>Total</b>	<b>6 885 523</b>	<b>12 297</b>

Luego de presentar los costos unitarios del cuadro 7.1 al 7.6 en la página 88; se hace la salvedad que el cálculo final de los costos relacionados a la totalidad del proyecto, se presentan en el anexo de Memoria de cálculo iterativa para separador, de la figura 9.49 a la 9.51, a partir de la página 134; valores tabulados en estilo de millares ó separador de miles.

La figura 9.51 en la página 134 muestra los costos totales, en donde los valores de las bombas son los más representativos con 11 323 000 colones (20 220 dólares), después los materiales y recubrimiento a aplicar en el separador con 3 220 000 colones (5750 dólares), le siguen los detectores de nivel con 1 048 320 colones (1872 dólares), luego los elevadores, resistencias y aislamiento térmico con 792 235 colones (1414 dólares) y por último las tuberías, válvulas y otros accesorios con 235 722 colones (421 dólares).

El precio final del proyecto es la suma de todos los costos anteriores incluidos y es de 16 619 477 colones (29 677 dólares) aproximadamente, monto en dólares variará dependiendo del tipo de cambio. Cabe destacar que si la central de generación sólo necesitara la construcción del diseño mecánico-estructural sin las bombas de recolección, los costos disminuirían abruptamente a un total de 5 296 277 colones (9458 dólares).

## Capítulo 8

# Conclusiones

1. El separador propuesto se diseñó con base en normativas existentes y, además, cumpliendo con características deseables de tamaño compacto, innovación y con capacidad para operar bajo distintas condiciones operacionales en centrales de generación de energía eléctrica.
2. El diseño propuesto es de funcionamiento modular, ya que está compuesto por dos canales independientes en cuanto a operación se refiere, pero que cumplen una misma función, que permiten ajustar el separador a diferentes necesidades de proceso de una central de generación eléctrica. Los subensambles o componentes de cada canal son removibles, tanto así que se puede modificar su disposición interna de estos (extracción de laberintos o baffles, número de placas paralelas por laberinto a utilizar, orientación de placas paralelas para mejorar separación de agua-hidrocarburos) con el fin de conseguir un diseño de gran utilidad y facilitar de gran manera el montaje, mantenimiento, transporte, entre otros. Asimismo, el separador, como elemento único, se interpreta como un módulo que complementa la central termoeléctrica a la que pertenece.
3. Para el apropiado dimensionamiento del separador, se estudió información relacionada con el tipo de combustible de la mezcla a separar, la adecuada geometría de diseño, su relación con el caudal de entrada, además de las propiedades de los fluidos dentro de la sección de separación, en donde, conociendo dichos parámetros, se calcularon las dimensiones del separador con el doble del caudal de entrada representativo para caso modelo del C.P Garabito con un valor de  $Q_e = 20 \text{ m}^3/\text{dia}$ .
4. Se desarrolló una hoja electrónica de cálculo utilizando MS Excel, que permite determinar las dimensiones generales del separador al ingresar parámetros de entrada de la mezcla o fluido a separar. Fundamentado en lo anterior se obtienen las dimensiones y otros parámetros de funcionamiento de los demás componentes asociados. Todo esto satisface la condición de un diseño parametrizado. Asimismo es importante destacar que, a partir de parámetros simples del fluido de entrada (caudal de entrada, propiedades del agua y propiedades del hidrocarburo como tamaño de glóbulos), se pueden dimensionar prácticamente todos los componentes del separador, seleccionar sus materiales y sus componentes auxiliares. La experiencia obtenida con el diseño de este proyecto trajo consigo relacionar el funcionamiento global de una central de generación eléctrica con el uso de sistemas auxiliares, mediante visitas de campo, así como los fundamentos de teoría de separación de mezclas, legislación ambiental y selección de materiales adecuados.
5. Para la selección de los sistemas auxiliares e instrumentación, se indagaron diferentes catálogos en busca de las mejores opciones para el diseño del separador en cuestión. Dentro de los sistemas auxiliares de mayor importancia, figuran la elección de los detectores de nivel de agua en el separador, detectores de nivel de hidrocarburos y las bombas asociadas al proceso. Si bien la elección de los sistemas auxiliares e instrumentación se hace con base en los parámetros operativos, la mayoría de estos sistemas seguirán siendo funcionales dentro de un amplio rango de variación de condiciones. Esto implica que si se desea adaptar el separador a otras condiciones operativas, la mayoría de los componentes periféricos seguirán siendo funcionales.

6. El separador se diseñó con dos canales tomando en cuenta las dimensiones finales obtenidas, de manera que si se necesitara realizar un mantenimiento en el separador, este podría continuar su función con normalidad, utilizando un solo canal y sin afectar el proceso de separación en la central de generación eléctrica, mientras que en el otro canal se realice el protocolo de mantenimiento respectivo. La implementación de esta configuración de canales es la manera menos costosa y más sencilla de asegurar la continuidad de la operación. No se consideró un tanque receptor o de derivación antes del separador, dado que el tanque requiere controles de nivel, otros sistemas de recolección, previstas de fondo de lodos y materiales que volverían el diseño aún más costoso por tratarse de un elemento fuera del proceso principal de separación, además de agregar un costo al separador diseñado. Es primordial en el diseño de cualquier separador contemplar una manera de no detener su función por mantenimientos o eventualidades.
7. La decisión de diseñar el separador con baffles o laberintos removibles en cada canal radica en el hecho que la geometría de un separador rectangular se puede aprovechar al máximo para mejorar el proceso de sedimentación de lodos, así como también aumentar la velocidad ascensional de los glóbulos de hidrocarburo a la superficie y promover la eficiencia del diseño.
8. Para la selección de materiales, el acero al carbón ASTM A-36 fue la elección final para el piso y paredes del separador, dadas sus propiedades y características mecánicas, además de la amplia presencia en distribuidores el mercado nacional. Igualmente, la preparación de la superficie y la elección del recubrimiento para el separador es otro aspecto de suma importancia, dado que un recubrimiento incorrecto supondría problemas de corrosión y de mantenimiento, por lo que al final se eligió un recubrimiento epóxico adecuado para superficies de acero internas y externas expuestas a hidrocarburos.
9. Los diagramas esquemáticos, hoja de cálculo electrónica en MS Excel, teoría y demás material presente en este trabajo final de graduación pueden ser utilizados en conjunto como una guía para el diseño y la construcción de un separador de agua-hidrocarburos basándose en los requerimientos y parámetros de operación del caso a tratar. Para utilizar estas herramientas es esencial tener conocimiento y claridad sobre las características del fluido a separar tales como caudales, tamaño de glóbulo del hidrocarburo en conjunto con la normativa de vertido correspondiente, con el fin de obtener la relación de esbeltez adecuada del diseño. Asimismo, el separador es parte esencial del diseño integral de la central de generación, por lo tanto, se debe tener un excelente conocimiento acerca de cómo funciona una central de generación termoeléctrica, puesto que es un requisito de funcionamiento y no se trata solamente de un sistema agregado.
10. Se desarrolló un protocolo general de mantenimiento en el que se hace énfasis a las prácticas comunes que debe seguir cada central de generación eléctrica donde se encuentre el separador. En este protocolo se detalla la periodicidad de cada mantenimiento, los pasos para realizar la limpieza del separador, la operación tanto manual como automática del mismo, así como también lo referente a la extracción de componentes mediante elevadores y flexibilidad de operación del separador.

## Capítulo 9

# Recomendaciones

1. Es importante mantener el separador en funcionamiento constante en las centrales de generación eléctrica, por lo que se recomienda que el diseño del separador cuente con dos canales de iguales dimensiones que operen al mismo tiempo. Lo anterior con el fin de asegurar la eficiencia operacional del proceso, sin interrupciones; si un canal se encuentra en mantenimiento, el otro canal trabajará plenamente durante el proceso.
2. La importancia de contar con resistencias eléctricas o calentadores de inmersión en este diseño, va de la mano con el control de la temperatura de la mezcla de agua-hidrocarburos, ya que se desea mejorar la eficiencia del proceso de separación en el separador. Estos dispositivos se deben ver como una mejora en caso que no se lleguen a cumplir con los parámetros establecidos por el Reglamento de Reuso y Vertido de aguas residuales (Ley N° 33601), por lo que se recomienda al usuario en el momento de la puesta en marcha del separador, tener en cuenta si se cumplen los parámetros de la ley para valorar el uso de dicho sistema de calefacción y siempre respetando la modularidad del diseño.
3. Para el sistema de calefacción eléctrica se recomienda utilizar fuentes de energía económicas que aprovechen el calor de rechazo disponible en el centro de producción.
4. Con respecto al tema de aislamiento térmico, dadas las condiciones del proceso de separación se debe tener en cuenta la legislación actual en materia de reuso y vertido de aguas residuales, en donde se debe mantener una temperatura  $T \leq 40^{\circ}\text{C}$ . Una de las mejoras a tomar en cuenta en la construcción es la de cubrir el cuerpo del separador con un aislamiento térmico capaz de mantener la temperatura de la mezcla de hidrocarburos en su valor adecuado, y además para evitar que la mezcla pierda sus propiedades en el proceso y a la salida del separador.
5. El diseño de la sección de separación debe apelar a la linealidad, en forma rectangular, dado que así se favorece a la separación de agua-hidrocarburos. Si la geometría es distinta, cada parte del separador no podrá cumplir con su función como debería y además si no se realizan cálculos dimensionales adecuados se puede incurrir en errores de diseño que puedan afectar tanto la eficiencia del separador, como encarecer más el proyecto.
6. Una incorrecta selección del recubrimiento protector para interior y exterior de tanques de almacenamiento puede originar una falla prematura y normalmente en costos de mantenimiento y reparación muy altos para cualquier empresa. Por ende, se deberán conocer todos los parámetros más importantes para especificar el mejor sistema de protección.
7. Si el separador se ubicara en un lugar al exterior con condiciones ambientales adversas, es de suma importancia conocer el medio ambiente atmosférico al que estarán expuestos los tanques: rural, industrial, marino ó marino industrial. Si el separador se ubica en un lugar bajo techo, es de vital importancia conocer el tipo de producto que va a contener el tanque, su agresividad química,

pH, temperatura, inflamabilidad, entre otros. Por el tipo de desempeño, los recubrimientos para interiores son diseñados y especificados siguiendo un procedimientos especiales de selección.

8. La central de generación eléctrica en donde se ubique el separador, debe tener en cuenta los reglamentos y normas NFPA para sistemas de protección contra incendios, así como también seguir las medidas de seguridad ocupacional correspondientes. Esto con el fin de prevenir cualquier accidente relacionado al manejo de hidrocarburos en dicho lugar. Por ello se recomienda la instalación de extintores de polvo químico en la periferia del separador.
9. El separador de agua-hidrocarburos debe estar ubicado en un lugar donde si ocurre un derrame no afecte la seguridad de los operadores ni de la central de generación eléctrica, por lo que se recomienda también un muro de contención en la periferia del separador de 120 % del volumen contenido del tanque.
10. El diseño de la obra civil (muro de contención, techo, lugar de ubicación) y la obra electro-mecánica del separador de agua-hidrocarburos deben estar coordinados entre sí para así facilitar el mantenimiento y la operación del separador. La elección de los elevadores o malacates para extracción de componentes del separador está relacionada con la obra civil y electromecánica.

# Bibliografía

- [1] American Petroleum Institute. (1990). *Monographs on Refinery Environmental Control-Management of Water Discharges. Design and Operation of Oil-Water Separators*. API, Washington D.C., 1 edition.
- [2] Grinell Corporation. (1995). *Piping Design and Engineering*, volume 1. Grinell.
- [3] Kirby S. Mohr. (2001). Funcionamiento y uso adecuado de un separador de oleo aceite-agua. *Mohr Separations Research Inc.*, (1):1–11.
- [4] BSI-Global. (2003). *Separator systems for light liquids (e.g. oil and petrol). Selection of nominal size, installation, operation and maintenance.*, volume 2. BSI.
- [5] ACO. (2010). *Dispositivo de alarma ACO SECURAT para instalación en equipos separadores de hidrocarburos, con sondas de nivel de aceites y de nivel de acumulación de agua con caja de protección*. ACO SECURAT, Recuperado el 10 de mayo 2016, de <http://www.aco.es/uploads>.
- [6] Process Technology. (2010). Información de instalación y mantenimiento para calentadores eléctricos de inmersión. *Rev.: IMI 070610*.
- [7] Quiminet. (2010). Tipos de malacates y aplicación en la industria. *Malacates o elevadores*, (1):1–2, Recuperado el 05 de mayo 2016, de <http://www.quiminet.com/articulos/los-tipos-de-malacates-y-su-aplicacion-en-la-industria-45135.htm>.
- [8] American Petroleum Institute. (2013). *Welded Steel Tanks for Oil Storage*. API, Washington D.C., 8th edition edition.
- [9] ASTM International. (2014). *Standard Specification for Carbon Structural Steel*, volume Book of Standards Volume: 01.04. ASTM Subcommittee: A01.02.
- [10] El Blog Verde. (2015). Diagrama del proceso de formación de lluvia ácida. *Imagen de diagrama del proceso de formación de lluvia ácida*, (1), Recuperado el 5 de noviembre del 2015 desde <http://www.elblogverde.com>.
- [11] EXHEAT. (2015). Sistema de calefacción y control de proceso eléctrico de Área peligrosa. *Sistema de Calefacción*.
- [12] Isover Saint-Gobain. (2015). Recomendaciones de instalación. *Manual Isover Aislamiento Térmico*, 5(1):1–14, Recuperado el 10 de junio 2016, de <http://www.isover-aislamiento-tecnico.es/var/technicalinsulationes.pdf>.
- [13] Prodex. (2015). Brochure alublock para aplicaciones en la industria. *ALUBLOCK Aislamiento térmico*.
- [14] Aceros Dume. (2016). *Láminas Acero ASTM A 36*, (1):1–2, Recuperado el 20 de julio del 2016 desde <http://www.acerosdume.com/>.

- 
- [15] Acim-Jouanin. (2016). Calefactores de inmersión para aceite e hidrocarburos. *Acim-Jouanin*, vol. 1(1):1–3, Recuperado el 03 de mayo del 2016 desde <http://www.acim-jouanin.fr>.
- [16] Arcelor Mittal. (2016). Perfil vigas. *Vigas ASTM A-36*.
- [17] Autek Maquinaria. (2016). Elevacion. *Malacate o polipasto para obra*, (1):1–2, Recuperado el 06 de mayo 2016, de <http://www.autekmaquinaria.com.mx/wp-content/uploads/2015/05/MALACATES-500FOLLETO.pdf>.
- [18] Coulton. (2016). Coulton ultrasonic. *Detector ultrasonido de nivel de agua en separador*, (1):1, 2016. Recuperado el 5 de junio del 2016 desde <http://www.coulton.com>.
- [19] Hempel. (2016). Hempadur 15400. *Productos Hempel*, (1):1–2, Recuperado el 20 de agosto 2016, de <http://www.hempel.es/es-ES/products/hempadur-15400>.
- [20] Lesman SIEMENS. (2016). The probe siemens ultrasonic. (1):1–50, Recuperado el 14 de agosto del 2016 desde <http://www.lesman.com>.
- [21] Morris C. Cutler, J. (2009). *Dictionary of Energy (Expanded Edition)*. Recuperado el 16 de setiembre 2015, de <http://app.knovel.com/hotlink/toc/id:kpDEEE0001/dictionary-energy-expanded/dictionary-energy-expanded>.
- [22] Ministerio de Ambiente y Energía. (1997). *Reglamento de Vertido y Reuso de Aguas Residuales. N° 33601*. MINAE, San José, n° 33601 edition.
- [23] Altos Hornos de México AHMSA. (2013). *Normas y Características a las que se sujetan los aceros fabricados por altos hornos de México*, volume 1. AHMSA.
- [24] Okun D. Fair, G.(1968). *Water and Waste Water Engineering*, volume Vol. 2, Water Purification and Wastewater Treatment Disposal. John Wiley and Sons, New York, 1 edition.
- [25] R. (2010). Obando. *Procedimiento de selección de un separador para limpieza de aguas residuales en sitios donde se manipulan hidrocarburos*. San José, Costa Rica.
- [26] University of Washington. (2008). Oil water separators. *Oil Water Separators*, vol. 5:11, September, 2008.
- [27] Vashi R.T. Patel, Himanshu. (2015). *Characterization and Treatment of Textile Wastewater 2.2.4.2 Pretreatment*. Elsevier, Recuperado el 01 de octubre 2015, de <http://app.knovel.com/hotlink/pdf/id:kt00UCKFG2/characterization-treatment/pretreatment>.
- [28] R. Ramalho. (1993). *Tratamiento de Aguas Residuales*, volume 1. Editorial Reverté, S.A., Barcelona, España.
- [29] Bhandari Vinay M. Ranade, V. (2014). *Industrial Wastewater Treatment, Recycling and Reuse*, volume 1.1.3.
- [30] J. Sainz Sastre. (2004). *Separación de aceites de efluentes industriales Tipos de separadores, criterios de selección y diseño*. Ecolaire España, S.A., División de Medio Ambiente.
- [31] James. Speight, J. (2011). *Handbook of Industrial Hydrocarbon Processes, Analysis of Hydrocarbons in the Environment*. Elsevier, Recuperado el 10 de octubre 2015, de <http://app.knovel.com/hotlink/pdf/id:kt0090TNF6/handbook-industrial-hydrocarbon/analysis-hydrocarbons>.
- [32] Drinan J. Spellman, F. (2000). *The Drinking Water Handbook*. Technomic Pub.Co, Lancaster, PA.
-



# Anexos

## Anexo A.1. Cronograma de actividades

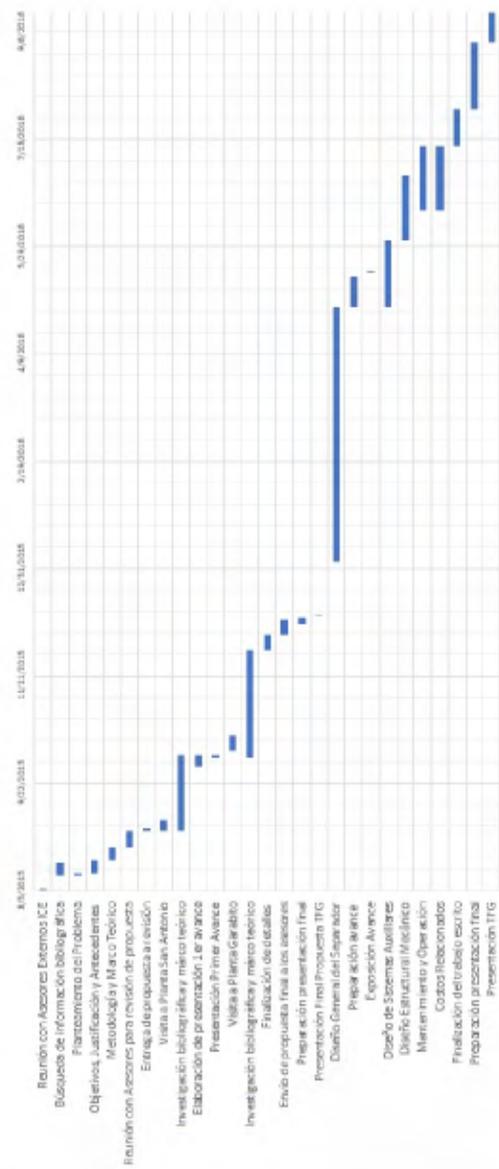


Figura 9.1: Cronograma de actividades. Fuente: Elaboración propia (2016)

## Anexo A.2. Visita de campo a C.P San Antonio



Figura 9.2: Vista de plano C.P San Antonio. Fuente: Elaboración propia (2015)



Figura 9.3: Separador C.P San Antonio. Fuente: Elaboración propia (2015)



Figura 9.4: Diques. Fuente: Elaboración propia (2015)



Figura 9.5: Piletas de lavado. Fuente: Elaboración propia (2015)



Figura 9.6: Bombas centrífugas de purificación. Fuente: Elaboración propia (2015)



Figura 9.7: Bombas Skid. Fuente: Elaboración propia (2015)

### Anexo A.3. Visita de campo a C.P Garabito

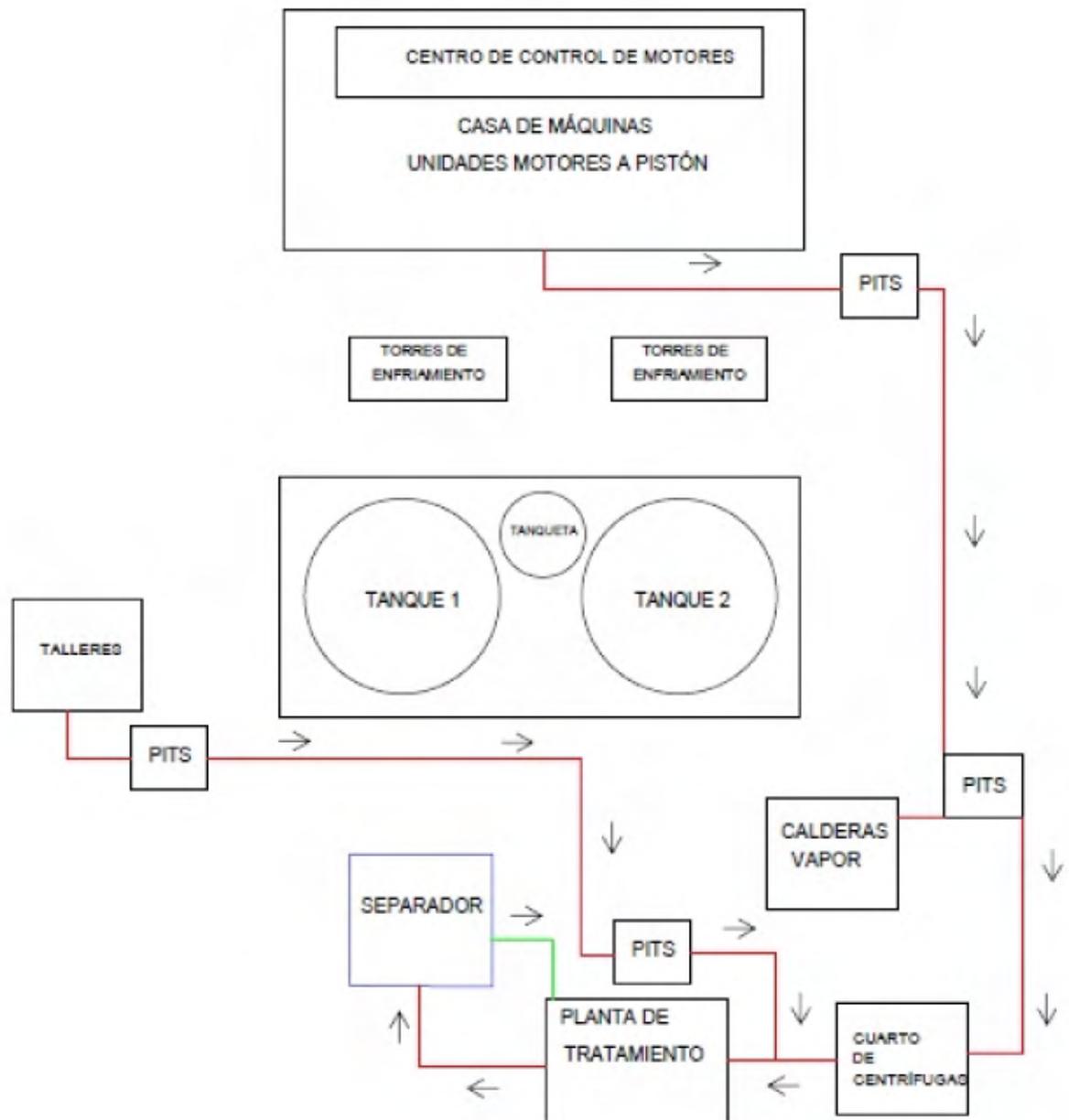


Figura 9.8: Vista de plano C.P Garabito. Fuente: Elaboración propia (2015)



Figura 9.9: Casa de máquinas con motores de combustión interna recíprocos. Fuente: Elaboración propia (2015)



Figura 9.10: Bombas centrífugas de purificación. Fuente: Elaboración propia (2015)



Figura 9.11: Pits ubicados a lo largo del C.P Garabito. Fuente: Elaboración propia (2015)



Figura 9.12: Tanque de almacenamiento de aguas residuales-lodos. Fuente: Elaboración propia (2015)



Figura 9.13: Separador C.P Garabito grande. Fuente: Elaboración propia (2015)



Figura 9.14: Separador C.P Garabito pequeño. Fuente: Elaboración propia (2015)



Figura 9.15: Tanque de almacenamiento de aguas residuales pre-tratadas. Fuente: Elaboración propia (2015)



Figura 9.16: Agua tratada y lista para restituir al río. Fuente: Elaboración propia (2015)

## Anexo A.4. Sistemas de calefacción eléctrica

T/21 Technical information/reference data

Chromalox®

### Heater selection nomographs/strip heater

#### To use curve

1. Select maximum desired work temperature on (A).
2. Choose either chrome steel sheath or rust-resisting iron sheath (points B) on basis of operating conditions.
3. Draw straight line through points (A) and (B) to reading on (C) giving maximum allowable watts per square inch.
4. Select desired length heater with equivalent watt density or less.

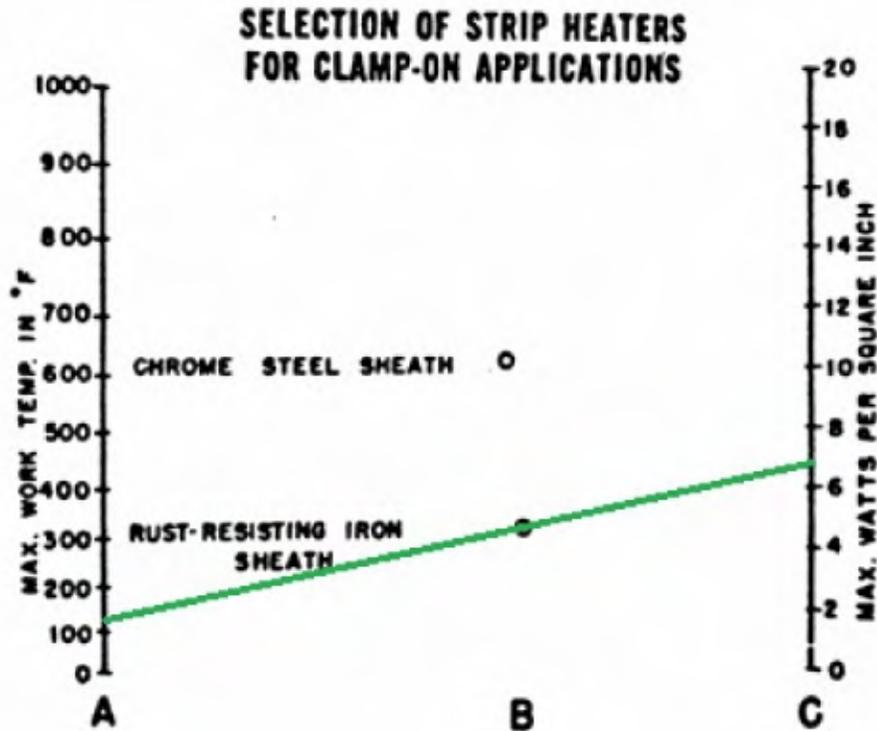


Figura 9.17: Nomograma para elección de calefactor de inmersión eléctrica. Fuente: Chromalox (2016)



**CALENTADORES DE INMERSION  
PARA ACEITE Y FUEL :**

Potencia P (W)	L. InmERG. LT (mm)
3000	285
4000	325
5000	370
6000	415
8000	500
9000	545
10000	590
12000	670
15000	805
18000	935
20000	1020
25000	1230



Tapa destinada a los calentadores  
de inmersión con brida.  
Descripción tapa y accesorios, p6.

Figura 9.18: Especificaciones calefactor de inmersión eléctrica. Fuente: Acim-Jouanin (2016)

## Anexo A.5. Aislamiento térmico

CARACTERÍSTICAS	VALOR	NORMA
ESTRUCTURA DE CELDA ESPUMA	Cerrada	-
PESO PROMEDIO POR M <sup>2</sup>	0,204 kg/m <sup>2</sup>	-
PERMEABILIDAD AL AGUA	Impermeable	Dir. UEAtc
PERMEABILIDAD AL VAPOR DE AGUA	0.033 g/m <sup>2</sup> hPa - 0.05 perms (gr/ft <sup>2</sup> h.in.hg)	ASTM E 96/IRAM 1735
ÍNDICE DE FLAMA	0	ASTM E-84-99
DESARROLLO DE HUMO	15	ASTM E-84-99
EMITANCIA	0.03	ASTM C-1371-98
RESISTENCIA A HONGOS	Resistente / No promueve crecimiento de hongos – moho	ASTM C 1338
RESISTENCIA A LA CORROSIÓN	Cumple	ASTM C-1224
RESISTENCIA AL AGRIETAMIENTO	Cumple	ASTM C-1224
RESISTENCIA A LA DESLAMINACIÓN	Cumple	ASTM C-1224
RESISTENCIA A LA HUMEDAD	Cumple	ASTM C-1258
RESISTENCIA A LA TENSIÓN (DM)	13.3 N/cm	ASTM D -638
TEMPERATURA DE OPERACIÓN	- 20°C / 80°C	ASTM C-1224
DENSIDAD DEL POLIESTIRENO	16 kg/m <sup>3</sup>	NOM-C126
RESISTENCIA COMPRESIÓN 10% DEF. DEL POLIESTIRENO	0,70 kg/m <sup>2</sup>	NOM-C209
RESISTENCIA A LA FLEXIÓN DEL POLIESTIRENO	1,75 kg/m <sup>2</sup>	NOM-C176
ABSORCIÓN DE AGUA DEL POLIESTIRENO	2,5%	NOM-C212
CONDUCTIVIDAD TÉRMICA DEL POLIESTIRENO	0,30 kcal/mh°C	NOM-C189

Figura 9.19: Especificaciones aislamiento térmico ALUBLOCK. Fuente: Prodex ALUBLOCK (2016)

## Anexo A.6. Bombas para recolección de lodos de fondo

### CONSTRUCTION — SERIES ① 4195 (“GG” THROUGH “AL” SIZES)

Standard Construction Models	Casing	Head	Rotor	Idler	Motor Shaft and Idler Pin	Idler Bushing	Internal Safety Relief Valve
GG4195 HJ4195	Iron	Iron	② Iron	③ Iron	Steel	Carbon Graphite	Iron
HL4195	Iron	Iron	Ductile Iron	Iron	Steel	Carbon Graphite	Iron
AS4195 AK4195 AL4195	Iron	Iron	Ductile Iron	Ductile Iron	Steel	Carbon Graphite	Iron

### SPECIFICATION — UNMOUNTED PUMPS

Model Numbers	Port Size (NPT)	① Nominal Pump Rating		Motor Horsepower Required At Rated Speed Pumping 100 SSU Liquid		Maximum Hydrostatic Pressure	② Maximum Pump Discharge Pressure	③ Maximum Temperature	④ Steel Fitted Construction Recommended Above This Viscosity	Approximate Shipping Weight With Valve (Less Power)
		GPM (m <sup>3</sup> /hr)	RPM	50 PSI (3.3 BAR)	100 PSI (7 BAR)					
GG4195	1	10 (3) 7 (2)	1800 1200	¾ ½	1 ¾	400 (28)	100 (7)—below 38 SSU 150 (10)—38 to 100 SSU 250 (17)—above 100 SSU	225°F (107°C)	7500 (1619)	20 (9)
HJ4195	1½	20 (4.5) 13 (3)	1800 1200	1½ 1	2 1½	400 (28)	100 (7)—below 38 SSU 150 (10)—38 to 100 SSU 250 (17)—above 100 SSU	225°F (107°C)	7500 (1619)	44 (20)
HL4195	1½	30 (7) 20 (4.5)	1800 1200	2 1½	3 2	400 (28)	100 (7)—below 38 SSU 150 (10)—38 to 100 SSU 250 (17)—above 100 SSU	225°F (107°C)	⑤	44 (20)
AS4195	2½	35 (8)	1200	2	3	400 (28)	100 (7)—below 38 SSU 150 (10)—38 to 100 SSU 250 (17)—above 100 SSU	225°F (107°C)	⑤	86 (38)
AK4195	2½	50 (11)	1200	3	6	400 (28)	100 (7)—below 38 SSU 150 (10)—38 to 100 SSU 250 (17)—above 100 SSU	225°F (107°C)	⑤	86 (38)
AL4195	3	75 (17)	1200	5	7½	400 (28)	100 (7)—below 38 SSU 150 (10)—38 to 100 SSU 250 (17)—above 100 SSU	225°F (107°C)	⑤	86 (38)

① Standard Buna-N seal from -20°F. to +225°F. With special construction, temperatures from -40°F. to +350°F. can be handled with this series.

② When steel fitted construction is required, “GG” will have steel rotor, “HJ” will have ductile iron rotor.

③ “GG” size has steel idler.

Metric conversions are based on US measurements and rounded to the nearest whole number.

④ Nominal capacities based on handling thin liquids at 1800 RPM on three small sizes, 1200 RPM on three large sizes.

⑤ For viscosities above 15,000 SSU (3,300 cSt), provide details for recommendations.

⑥ These models have ductile iron rotors; steel fitted rotors not necessary.

⑦ If suction pressure exceeds 100 PSIG (7 BAR), consult factory.

VICAN PUMP • Windsor, ON, N9A 6M3

©2005

Figura 9.20: Especificaciones de catálogo bomba elegida Vican Heavy Duty Pumps. Fuente: Vican Pumps (2005)

**SPECIFICATIONS — "D" DRIVE UNITS**

Model Numbers	Port Size (NPT)	① Nominal Pump Rating		Motor Horsepower Required At Rated Speed Pumping 100 SSU Liquid		Maximum Hydraulic Pressure	② Maximum Pump Discharge Pressure	② Maximum Temperature	③ Steel Fitted Construction Recommended Above This Viscosity	Approximate Shipping Weight With Valve (Less Power)
		GPM (m <sup>3</sup> /hr)	RPM	50 PSI (3.5 BAR)	100 PSI (7 BAR)					
GG4195D	1	10 (3) 7 (2)	1800 1200	¾ ½	1 ¾	400 (26)	100 (7)—below 38 SSU 150 (10)—38 to 100 SSU 250 (17)—above 100 SSU	225°F (107°C)	7500 (1619)	46 (21)
HJ4195D	1½	20 (4.5) 13 (3)	1800 1200	1½ 1	2 1½	400 (26)	100 (7)—below 38 SSU 150 (10)—38 to 100 SSU 250 (17)—above 100 SSU	225°F (107°C)	7500 (1619)	69 (31)
HL4195D	1½	30 (7) 20 (4.5)	1800 1200	2 1½	3 2	400 (26)	100 (7)—below 38 SSU 150 (10)—38 to 100 SSU 250 (17)—above 100 SSU	225°F (107°C)	Ⓞ	69 (31)
AS4195D	2½	35 (8)	1200	2	3	400 (26)	100 (7)—below 38 SSU 150 (10)—38 to 100 SSU 250 (17)—above 100 SSU	225°F (107°C)	Ⓞ	215 (97)
<b>AK4195D</b>	<b>2½</b>	<b>50 (11)</b>	<b>1200</b>	<b>3</b>	<b>5</b>	<b>400 (26)</b>	<b>100 (7)—below 38 SSU 150 (10)—38 to 100 SSU 250 (17)—above 100 SSU</b>	<b>225°F (107°C)</b>	<b>Ⓞ</b>	<b>215 (97)</b>
AL4195D	3	75 (17)	1200	5	7½	400 (26)	100 (7)—below 38 SSU 150 (10)—38 to 100 SSU 250 (17)—above 100 SSU	225°F (107°C)	Ⓞ	220 (100)

① Nominal capacities based on handling thin liquids at 1800 RPM on three small sizes, 1200 RPM on three large sizes.  
 ② With special construction, temperatures to + 350°F. can be handled with this series.  
 ③ For viscosities above 15,000 SSU (3,300 cSt), provide details for recommendations.  
 ④ These models have ductile iron rotors; steel fitted rotors not necessary.  
 ⑤ If suction pressure exceeds 100 PSIG (7 BAR), consult factory.

Metric conversions are based on US measurements and rounded to the nearest whole number.

VICAN PUMP • Windsor, ON, N9A 6M3

©2005

Figura 9.21: Especificaciones de catálogo motor bomba elegida Vican Heavy Duty Pumps. Fuente: Vican Pumps (2005)

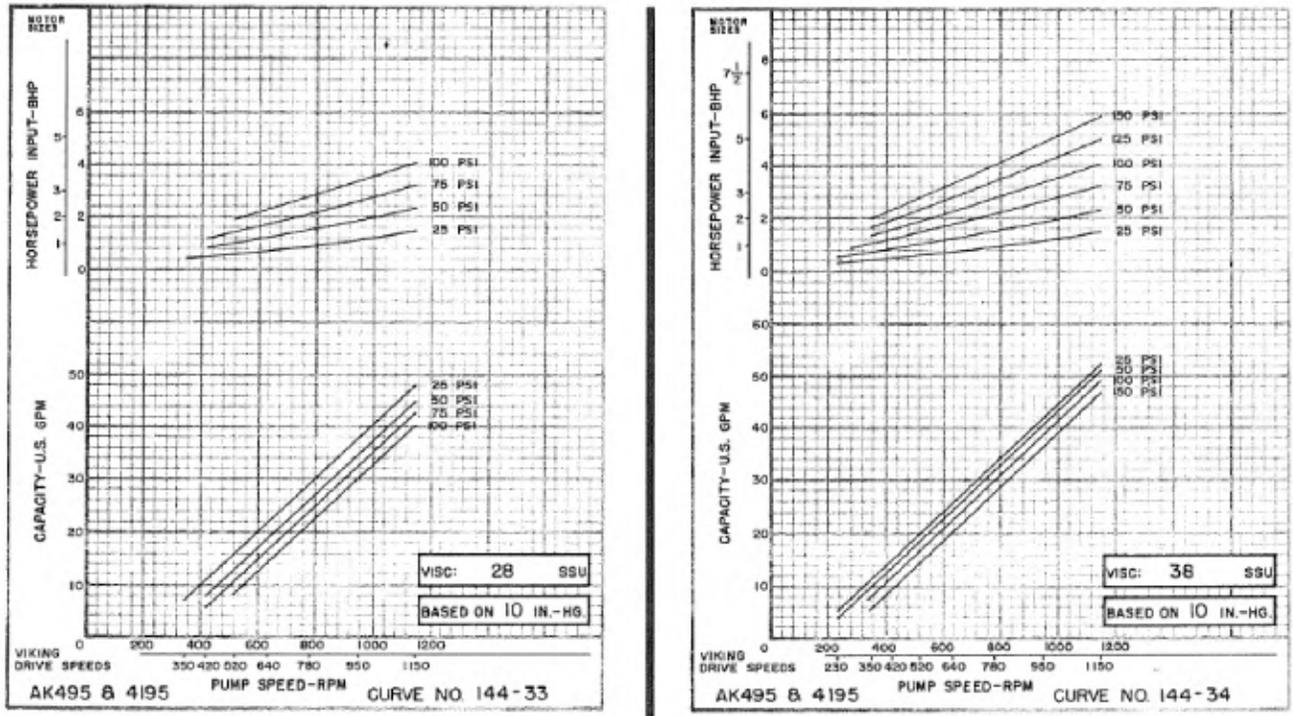


Figura 9.22: Curvas de operación bomba lodos con motor. Fuente: Vican Pumps (2016)

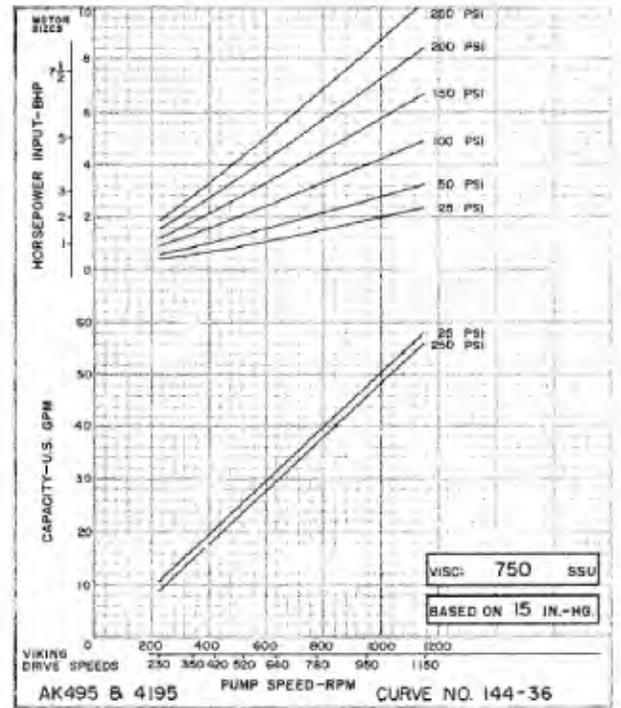
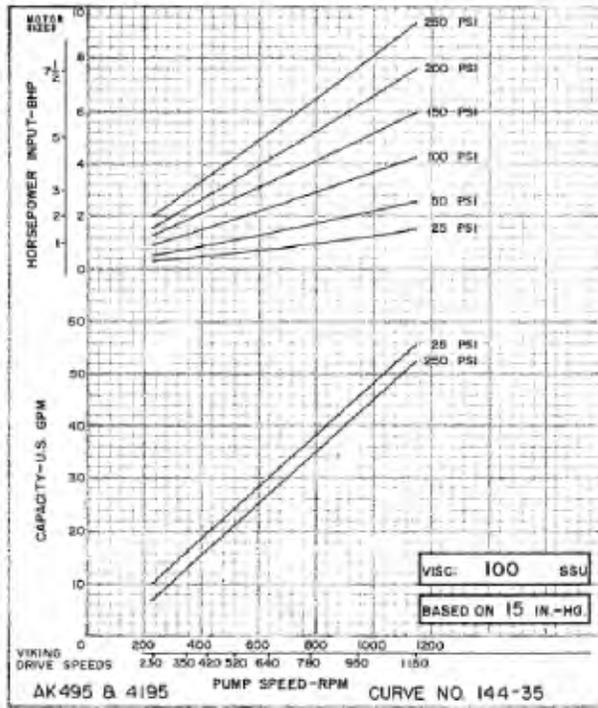


Figura 9.23: Curvas de operación bomba lodos con motor. Fuente: Vican Pumps (2016)

## Anexo A.7. Bombas para recolección de aceite-hidrocarburos

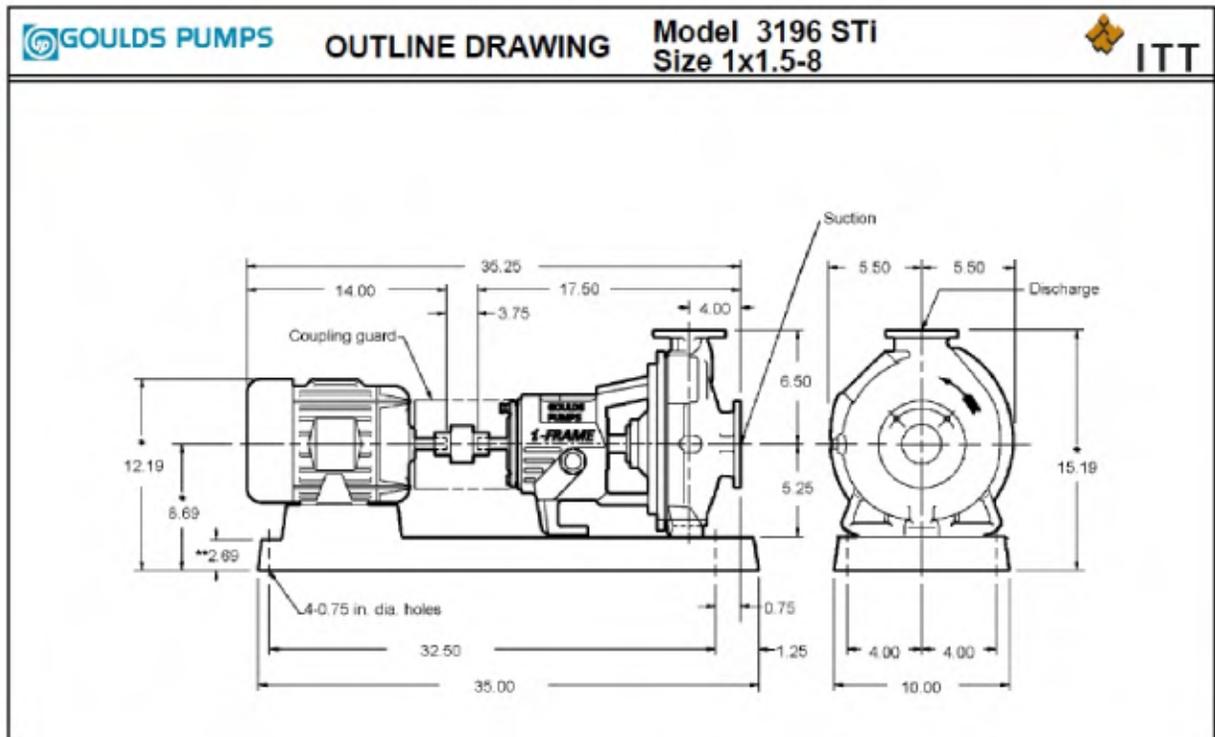


Figura 9.24: Especificaciones de catálogo bomba elegida Goulds Pumps. Fuente: Goulds Pumps (2016)

### Pump Specification

SUCT. FLANGE SIZE	1.5"	DRILLING	ANSI 150*	FACING	FF	FINISH	SERRATED	
DISCH. FLANGE SIZE	1"	DRILLING	ANSI 150*	FACING	FF	FINISH	SERRATED	
PUMP ROTATION (LOOKING AT PUMP FROM MOTOR)	CW							
TYPE OF LUBRICATION	FLOOD OIL			COOLED				NO
TYPE OF STUFFING BOX	TAPER BORE PLUS WITH AXIAL RIBS			COOLED				NO
TYPE OF SEALING	MECHANICAL SEAL							

### Weights and Measurements

PUMP	100.0 lb
MOTOR/CPLG	50.0/2.0 lb
BASEPLATE	75.0 lb
TOTAL	227.0 lb
GR VOLUME w/BOX	13.9 ft <sup>3</sup>
GR WEIGHT w/BOX	297.0 lb

### Motor Specification

MOTOR BY	PUMP MFG	MOUNT BY	PUMP MFG	MFG.	PUMP MFG'S CHOICE
FRAME	145T	POWER	2.0 hp	RPM	1800
PHASE	3	FREQUENCY	60 HZ	VOLTS	460
INSULATION	F	S.F.	1.15		
ENCLOSURE	TEFC - PREMIUM EFFICIENCY				

### Notes and References

- MTR DIMENSIONS ARE APPROXIMATE
- INSTALL FOUNDATION BOLTS IN PIPE SLEEVES
- ALLOW FROM 0.75 to 1.50in. FOR GROUTING. SEE INSTRUCTION BOOK FOR DETAILS.
- \* Tolerance is -0.30 +0.30
- DISCHARGE FLANGE HAS 4-1/2-13 UNC TAPPED HOLES
- \*\* Foundation bolt grip thickness

### Auxiliary Specification

COUPLING BY	PUMP MFG	CPLG TYPE	RESINOID-OMEGA REX ELASTOMER, ISO (STANDARD ORANGE)
CPL GUARD BY	PUMP MFG	CPLG GUARD MATL.	CARBON STEEL
BASEPLATE	CAST IRON CAMBER TOP B00061A		
MECH SEAL	GOULDS SEALPLUS SP1CS (CARBON VS SILICON CARBIDE)		

FOR PUMP TAPPED OPENINGS REFER TO DWG.:  
TCREV16-09-08 01 / ITEM 001\_Aceite Hidrocarburos

Figura 9.25: Especificaciones de catálogo bomba elegida Goulds Pumps. Fuente: Goulds Pumps(2016)

Operating Conditions		Pump Performance			
Liquid:	Water	Published Efficiency:	47.5 %	Suction Specific Speed:	6,693 gpm(US) ft
Temp.:	70.0 deg F	Rated Pump Efficiency:	40.0 %	Min. Hydraulic Flow:	4.2 gpm
S.G./Misc.:	1.000/1.000 cp	Rated Total Power:	1.2 hp	Min. Thermal Flow:	N/A
Flow:	40.0 gpm	Non-Overloading Power:	1.6 hp		
TDH:	47.5 ft	Imp. Dia. First 1 Stg(s):	6.7500 in		
NPSHa:		NPSHr:	2.0 ft		
Solid size:		Shut off Head:	51.5 ft		
% Susp. Solids (by wtg):		Vapor Press:		Max. Solids Size:	0.3440 in

**Notes:** 1. Power and efficiency losses are not reflected on the curve below.  
2. Elevated temperature effects on performance are not included.

Figura 9.26: Especificaciones operativas de catálogo bomba elegida Goulds Pumps. Fuente: Goulds Pumps (2016)

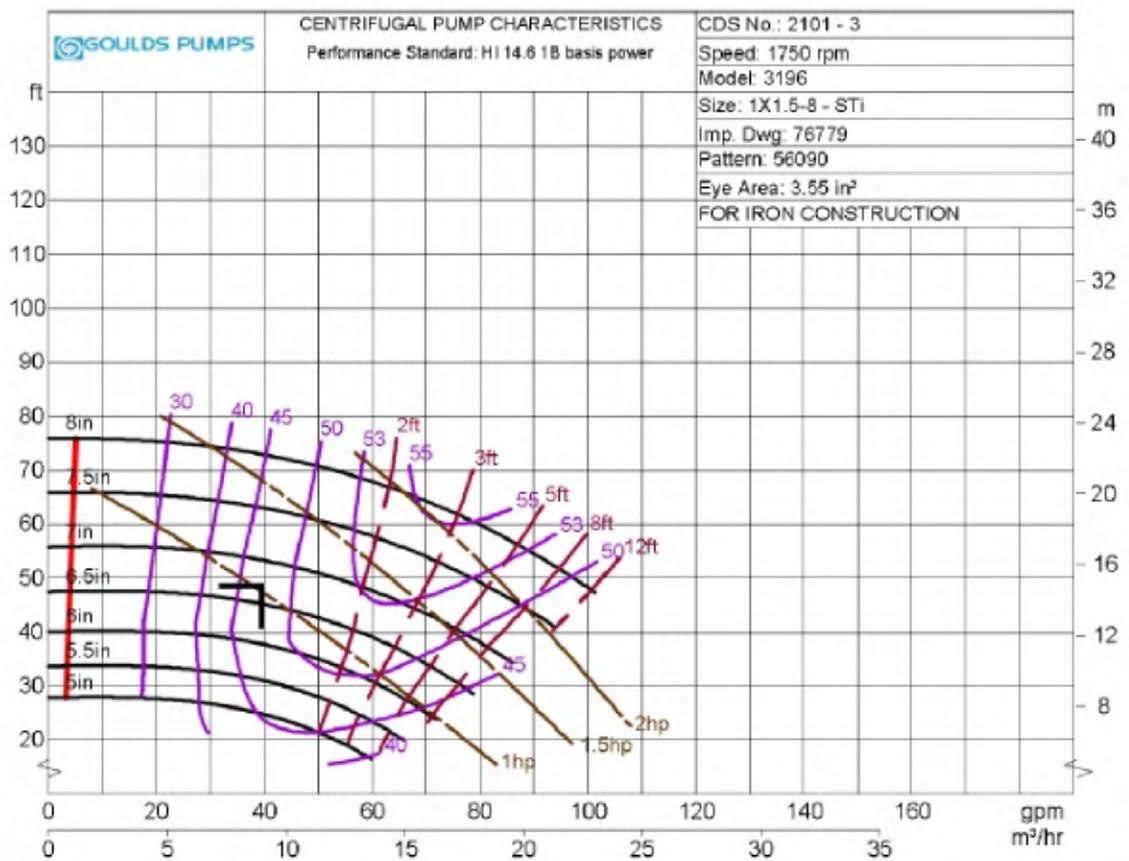


Figura 9.27: Curvas de operación bomba aceite-hidrocarburos con motor. Fuente: Goulds Pumps (2016)

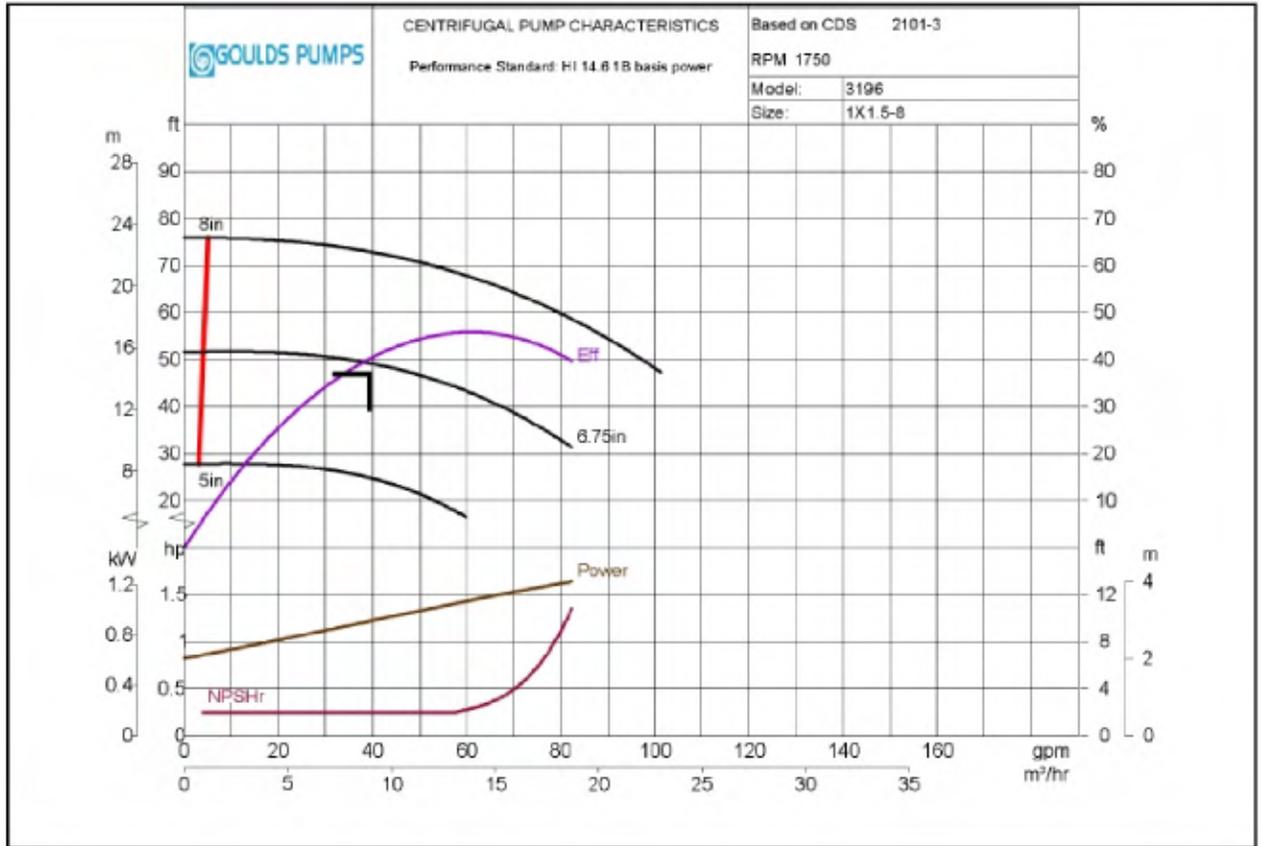


Figura 9.28: Curvas de operación bomba aceite-hidrocarburos con motor. Fuente: Goulds Pumps (2016)

## Anexo A.8. Perfil de vigas ASTM A-36 para soportes estructurales

### Características Técnicas

Designación (altura x ancho x masa en lbs/pie)	Dimensiones				Masa Linear	
	Altura (h) mm	Ancho (b) mm	Alma (tw) mm	Ala (tf) mm	lbs/pie	kg/m
WF 6"x 4" x 9	150	100	4,3	5,5	9	13,5
WF 6"x 4" x 12	153	102	5,8	7,1	12	18,0
WF 6"x 4" x 16	160	102	6,6	10,3	16	24,0
WF 6"x 6" x 15	152	152	5,8	6,6	15	22,5
WF 6"x 6" x 20	157	153	6,6	9,3	20	29,8
WF 6"x 6" x 25	162	154	8,1	11,6	25	37,1
WF 8"x 4" x 10	200	100	4,3	5,2	10	15,0
WF 8"x 4" x 13	203	102	5,8	6,5	13	19,3
WF 8"x 4" x 15	206	102	6,2	8	15	22,5
WF 8"x 5,25" x 18	207	133	5,8	8,4	18	26,6
WF 8"x 5,25" x 21	210	134	6,4	10,2	21	31,3
WF 8"x 6,5" x 24	201	165	6,2	10,2	24	35,9
WF 8"x 6,5" x 28	205	166	7,2	11,8	28	41,7
WF 8"x 8" x 31	203	203	7,2	11	31	46,1
WF 8"x 8" x 35	206	204	7,9	12,6	35	52,0
WF 8"x 8" x 48	216	206	10,2	17,4	48	71,0
WF 10"x 4" x 12	251	101	4,8	5,3	12	17,9
WF 10"x 4" x 15	254	102	5,8	6,9	15	22,3
WF 10"x 4" x 17	257	102	6,1	8,4	17	25,3
WF 10"x 4" x 19	260	102	6,4	10	19	28,4
WF 10"x 5,75" x 22	258	146	6,1	9,1	22	32,7
WF 10"x 5,75" x 26	262	147	6,6	11,2	26	38,5
WF 10"x 5,75" x 30	266	148	7,6	13	30	44,8
WF 10"x 8" x 33	247	202	7,4	11	33	49,1
WF 10"x 8" x 39	252	203	8	13,5	39	58,0
WF 10"x 8" x 45	257	204	8,9	15,7	45	67,0
WF 10"x 10" x 49	253	254	8,6	14,2	49	73,0
WF 10"x 10" x 60	260	256	10,7	17,3	60	89,0
WF 12"x 4" x 14	303	101	5,1	5,7	14	21,0
WF 12"x 4" x 16	305	101	5,6	6,7	16	23,8
WF 12"x 4" x 19	309	102	6	8,9	19	28,3
WF 12"x 4" x 22	313	102	6,6	10,8	22	32,7
WF 12"x 6,5" x 26	310	165	5,8	9,7	26	38,7

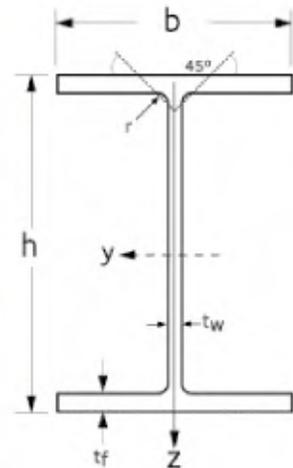


Figura 9.29: Perfil de vigas ASTM A-36 para soportes estructurales. Fuente: Arcelor Mittal (2016)

## Anexo A.9. Mantenimiento y operación

<b>MINOR PLUMA</b>		<b>300 (30m)</b>	<b>300 (60m)</b>	<b>500 (30m)</b>	<b>500 (60m)</b>
<b>Potencia de Elevación (Kg)</b>		325	325	500	500
<b>Velocidad de Elevación (m/min)</b>		22	22	22	22
<b>Cable</b>	<b>Longitud (m)</b>	30	60	30	60
	<b>Diámetro (mm)</b>	5	5	6	6
	<b>Carga de rotura (Kg)</b>	1,980	1,980	2,686	2,686
<b>Motor</b>	<b>Tipo (fases)</b>	Monofásico	Monofásico	Trifásico	Trifásico
	<b>Potencia (HP)</b>	2.2	2.2	3.5	3.5
	<b>Tensión (V)</b>	110	110	220	220
<b>Tensión de maniobra (V)</b>		48	48	48	48
<b>Radio de giro (mm)</b>		1,150	1,150	1,150	1,150
<b>Angulo de giro (°)</b>		360	360	360	360
<b>Peso (Kg)</b>		98	98	110	110
<b>Dimensiones (cm)</b>		235x155x205	235x155x205	235x155x205	235x155x205
<b>Volumen (m<sup>3</sup>)</b>		7.46	7.46	7.46	7.46

Figura 9.30: Especificaciones Malacate eléctrico tipo Pluma. Fuente: Autek Maquinaria (2016)

<b>MINOR POLIPASTO</b>		<b>GANCHOS 300</b>	<b>GANCHOS 500</b>
Potencia de Elevación (Kg)		325	500
Velocidad de Elevación (m/min)		22	22
Cable	Longitud (m)	30 / 60	30 / 60
	Diámetro (mm)	5	6
	Carga de rotura (Kg)	1,980	2,686
Motor	Tipo (fases)	Monofásico	Trifásico
	Potencia (HP)	2.2	3.5
	Tensión monofásico(V)	110	220
Tensión de maniobra (V)		48	48
Peso (Kg)		54	63
Dimensiones (cm)		45x57x42	45x57x42
Volumen (m <sup>3</sup> )		0.11	0.11

Figura 9.31: Especificaciones Malacate eléctrico tipo Polipasto. Fuente: Autek Maquinaria (2016)

## Anexo A.10. Dibujos y planos esquemáticos del separador

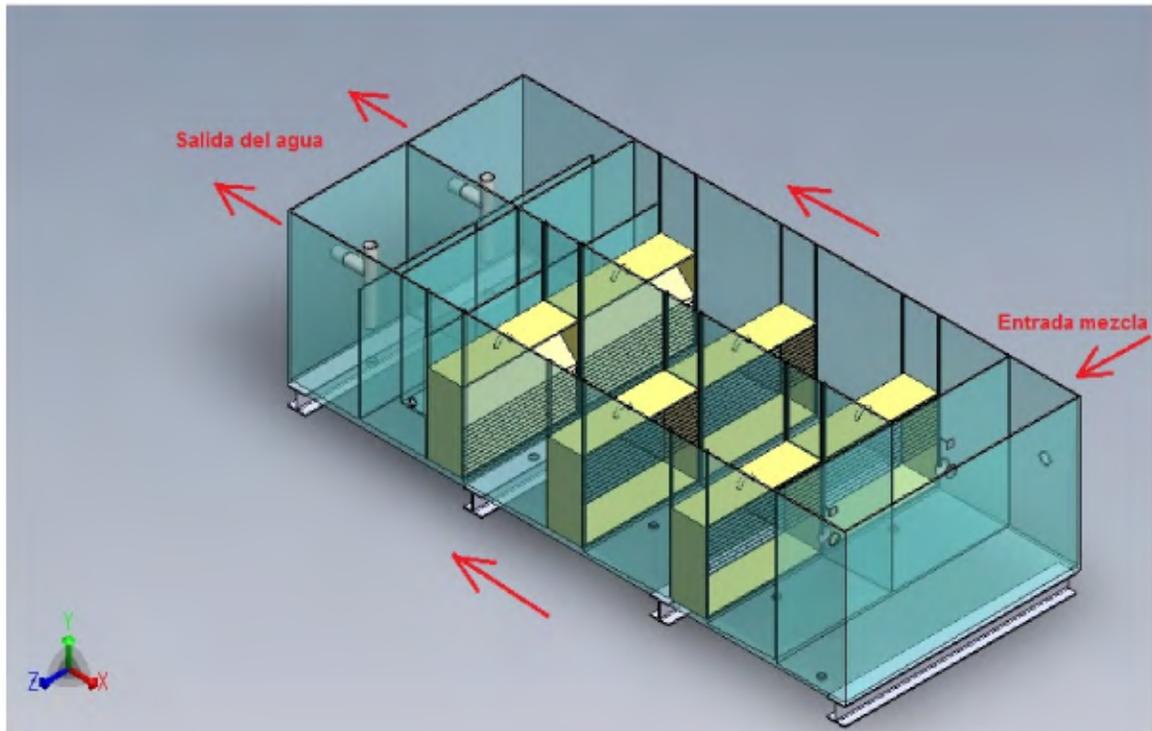


Figura 9.32: Isométrico con direcciones de flujo del separador. Fuente: Elaboración propia (2016)

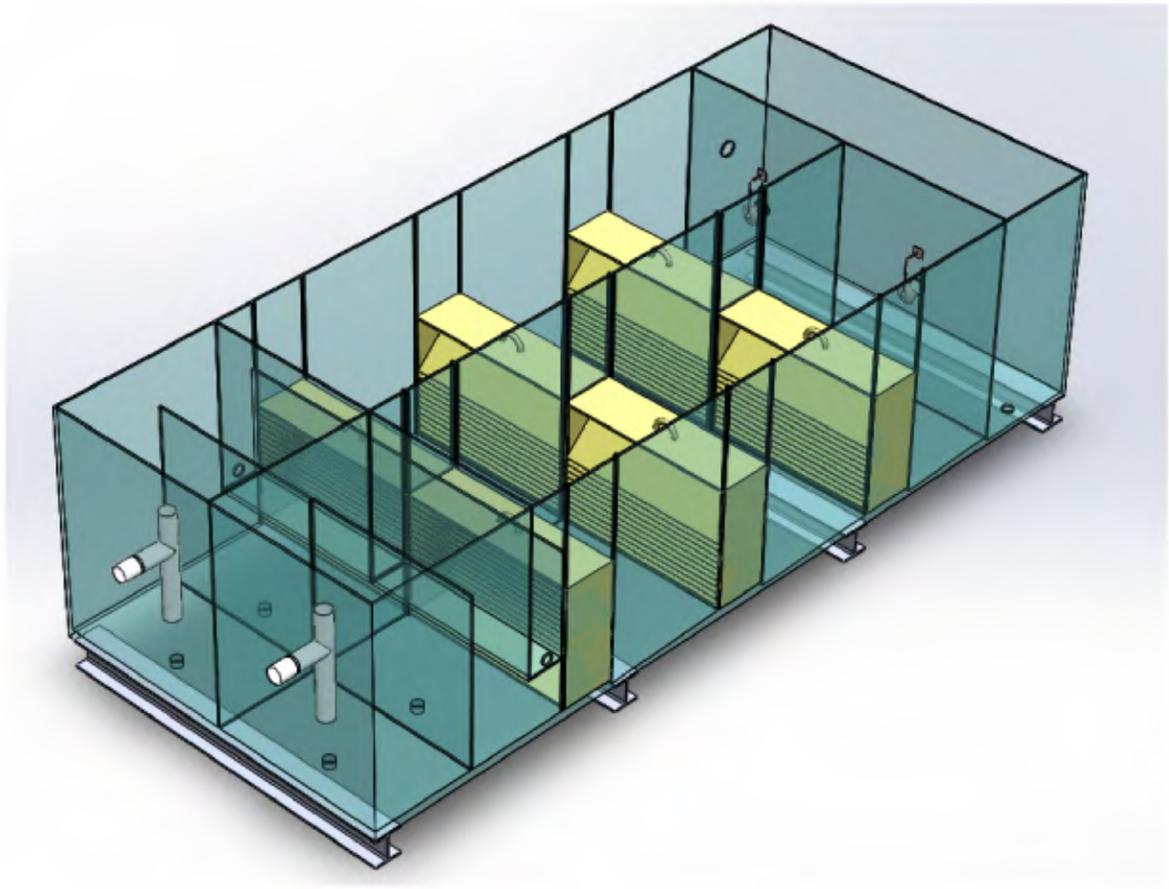


Figura 9.33: Isométrico final del separador. Fuente: Elaboración propia (2016)

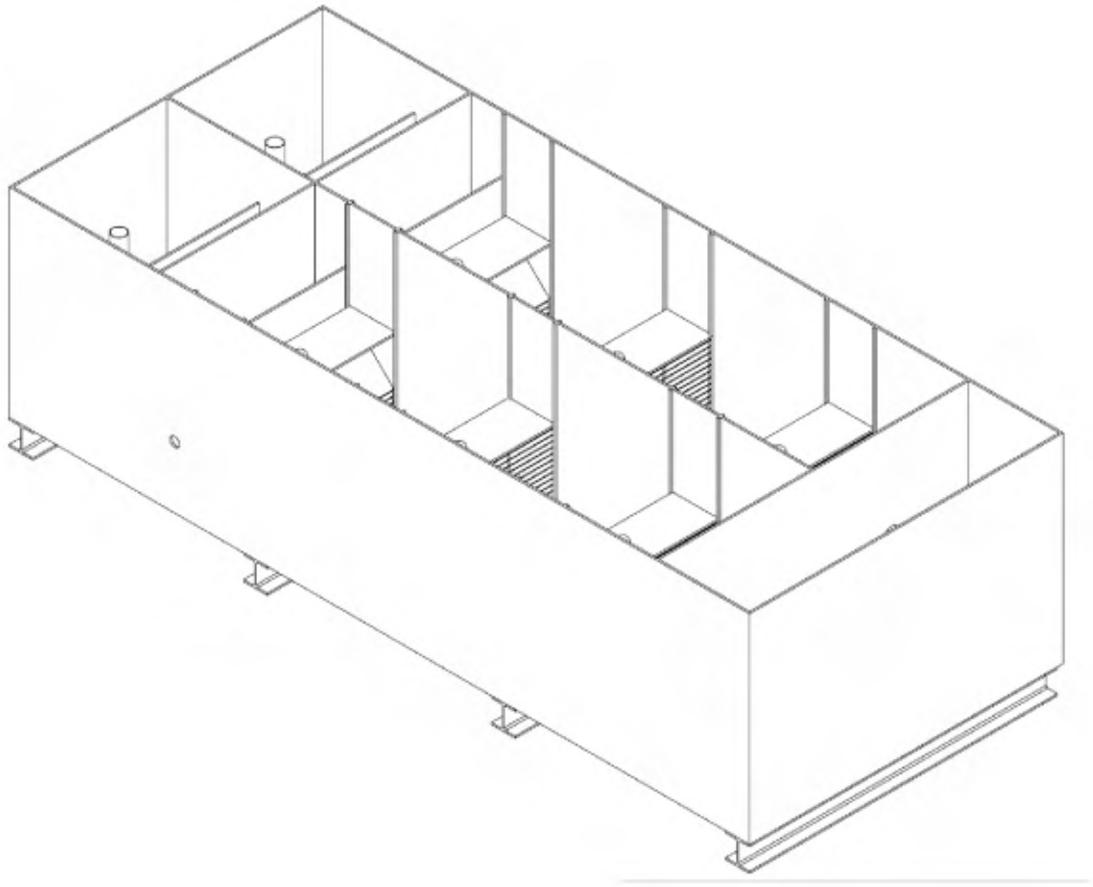


Figura 9.34: Plano esquemático de isométrico final del separador. Fuente: Elaboración propia (2016)

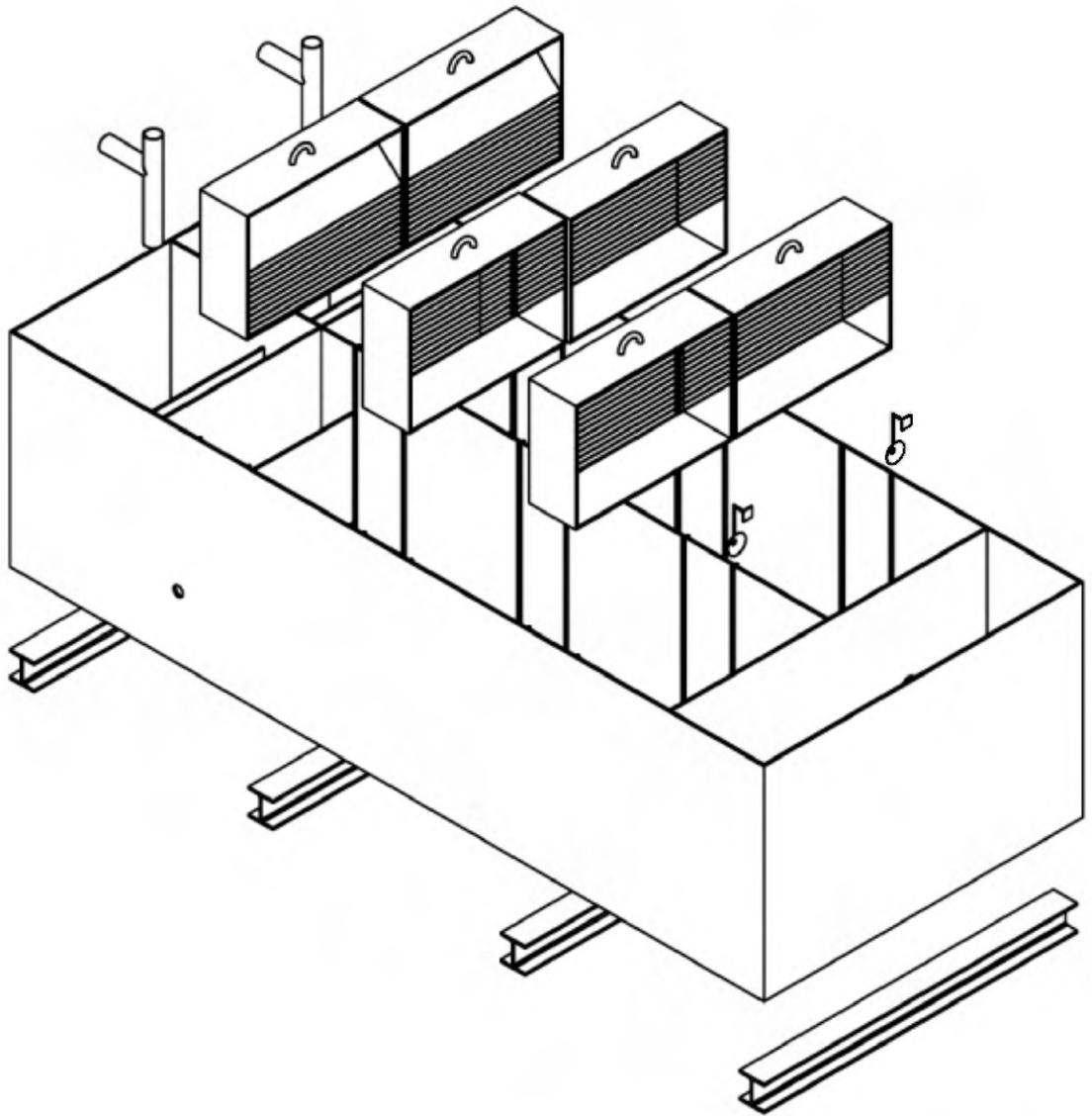


Figura 9.35: Plano esquemático de explosión de isométrico del separador. Fuente: Elaboración propia (2016)

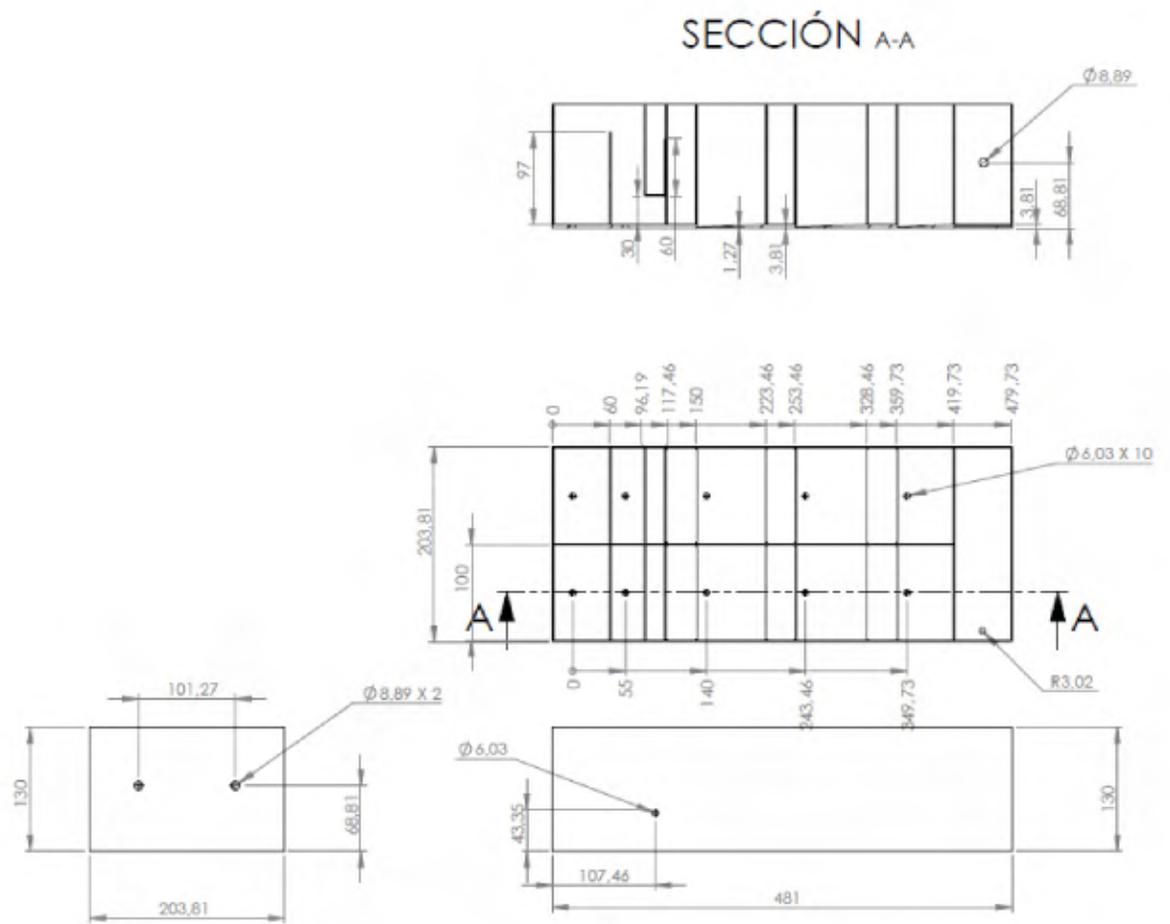


Figura 9.36: Plano esquemático del cuerpo del separador cotas en *cm*. Fuente: Elaboración propia (2016)

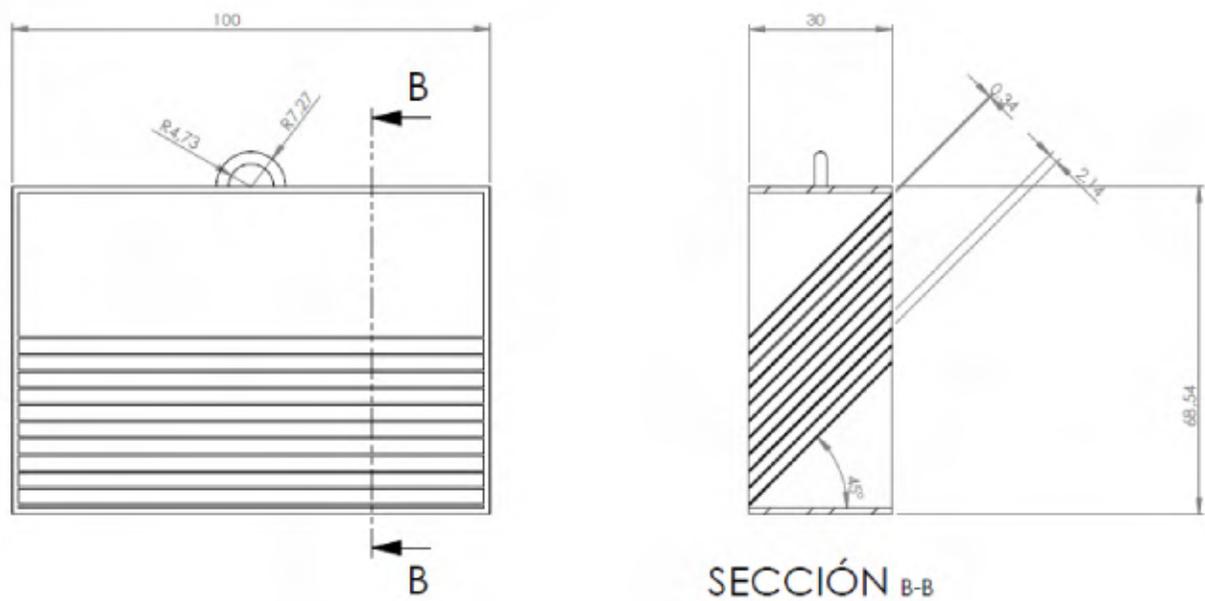


Figura 9.37: Plano esquemático de baffes del separador, cotas en *cm*. Fuente: Elaboración propia (2016)

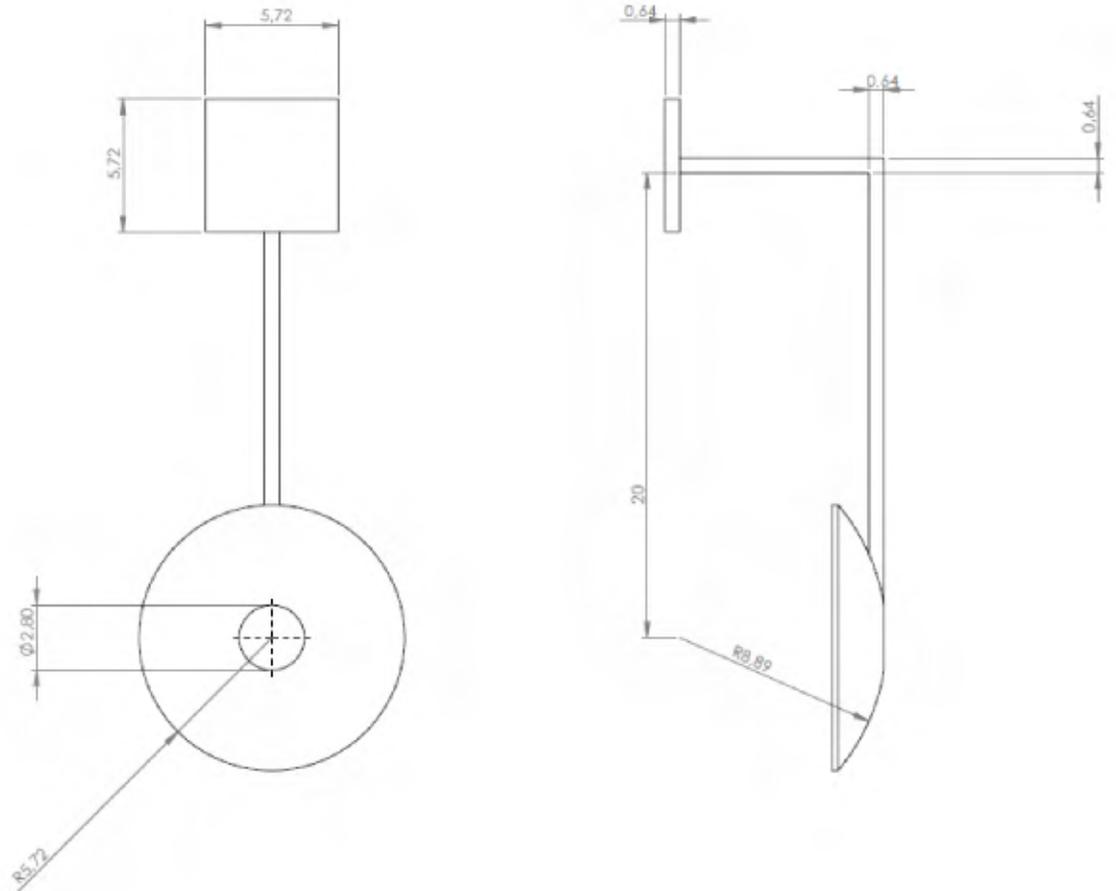


Figura 9.38: Plano esquemático de jets del separador, cotas en *cm*. Fuente: Elaboración propia (2016)

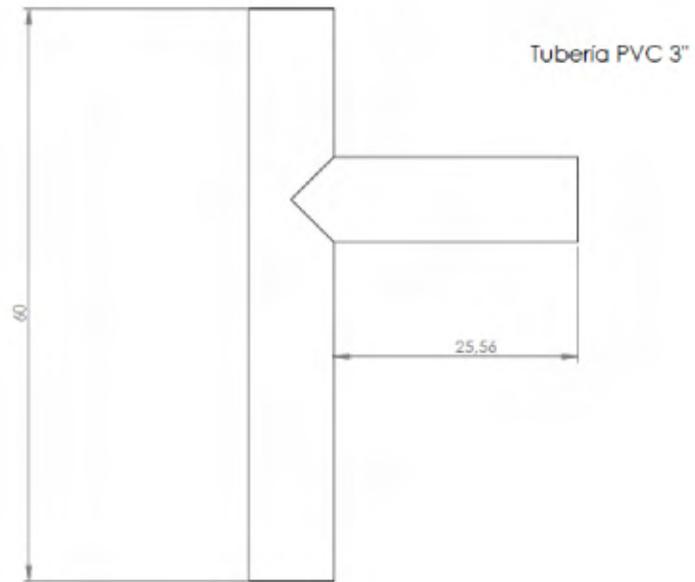


Figura 9.39: Plano esquemático de tuberías sifón del separador, cotas en *cm*. Fuente: Elaboración propia (2016)

## Anexo A.11. Memoria de cálculo iterativa para separadores

**TABLA 2. Propiedades del agua**

Unidades SI						
Temperatura (°C)	Densidad $\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	Viscosidad $\mu$ (N·s/m <sup>2</sup> )	Viscosidad cinemática $\nu$ (m <sup>2</sup> /s)	Tensión superficial $\sigma$ (N/m)	Presión de vapor (kPa)	Módulo de volumen B (Pa)
0	999.9	1.792 x 10 <sup>-3</sup>	1.792 x 10 <sup>-6</sup>	0.0762	0.610	204 x 10 <sup>7</sup>
5	1000.0	1.519	1.519	0.0754	0.872	206
10	999.7	1.308	1.308	0.0748	1.13	211
15	999.1	1.140	1.141	0.0741	1.60	214
20	998.2	1.005	1.007	0.0736	2.34	220
30	995.7	0.801	0.804	0.0718	4.24	223
40	992.2	0.656	0.661	0.0701	3.38	227
50	988.1	0.549	0.556	0.0682	12.3	230
60	983.2	0.469	0.477	0.0668	19.9	228
70	977.8	0.406	0.415	0.0650	31.2	225
80	971.8	0.357	0.367	0.0630	47.3	221
90	965.3	0.317	0.328	0.0612	70.1	216

Unidades Inglesas						
Temperatura (°F)	Densidad (slug/ft <sup>3</sup> )	Viscosidad (lb·s/ft <sup>2</sup> )	Viscosidad cinemática (ft <sup>2</sup> /s)	Tensión superficial (lb/ft)	Presión de vapor (psf)	Módulo de volumen (psf)
32	1.94	3.75 x 10 <sup>-5</sup>	1.93 x 10 <sup>-5</sup>	0.518 x 10 <sup>-2</sup>	0.089	293 000
40	1.94	3.23	1.66	0.514	0.122	294 000
50	1.94	2.74	1.41	0.509	0.178	305 000
60	1.94	2.36	1.22	0.504	0.256	311 000
70	1.94	2.05	1.06	0.500	0.340	320 000
80	1.93	1.80	0.93	0.492	0.507	322 000
90	1.93	1.60	0.83	0.486	0.698	323 000
100	1.93	1.42	0.74	0.480	0.949	327 000
120	1.92	1.17	0.61	0.465	1.69	333 000
140	1.91	0.98	0.51	0.454	2.89	330 000
160	1.90	0.84	0.44	0.441	4.74	326 000
180	1.88	0.73	0.39	0.426	7.51	318 000
200	1.87	0.64	0.34	0.412	11.53	308 000
212	1.86	0.59 x 10 <sup>-5</sup>	0.32 x 10 <sup>-5</sup>	0.404 x 10 <sup>-2</sup>	14.7	300000

Figura 9.40: Tabla propiedades agua para cálculos de diseño del separador

SIMBOLOGÍA DE COLORES MEMORIA ITERATIVA
TÍTULOS 1
TÍTULOS 2
TÍTULOS 3
TÍTULOS 4
Usuario Ingresar datos para cálculos
Criterio o Elección
Resultados Relaciones
Análisis Aceptado

Figura 9.41: Simbología memoria iterativa. Fuente: Elaboración propia (2016)

DISEÑO DE UN SEPARADOR AGUA-HIDROCARBUROS DEL TIPO MODULAR PARA CENTRALES DE GENERACIÓN ELÉCTRICA						
RELACIONES ITERATIVAS TAMAÑO DEL SEPARADOR UNIDADES SISTEMA INTERNACIONAL (SI)						
AUTORES: MAURICIO BARRANTES MURILLO B10851						
ALEJANDRO MARTÍNEZ ARANA B03701						
MARCO ANDRÉS RODRÍGUEZ SOLANO B05409						
ANÁLISIS DE TAMAÑO DEL SEPARADOR						
Relación C	D, profundidad (m)	Wc, ancho (m)	L, largo (m)	Relación L/Wc>5	Relación D/Wc entre 0.3 y 0.5	
22.794	1.900	2.000	43.308	21.654	0.950	
22.794	1.888	2.000	43.034	21.517	0.944	
22.794	1.886	2.000	42.989	21.494	0.943	
22.794	1.877	2.000	42.791	21.396	0.939	
22.794	1.870	2.000	42.632	21.316	0.935	
22.794	1.863	2.000	42.472	21.236	0.932	
22.794	1.856	2.000	42.313	21.156	0.928	
22.794	1.849	2.000	42.153	21.077	0.925	
22.794	1.842	2.000	41.994	20.997	0.921	
22.794	1.835	2.000	41.834	20.917	0.918	
22.794	1.828	2.000	41.674	20.837	0.914	
22.794	1.821	2.000	41.515	20.757	0.911	
22.794	1.814	2.000	41.355	20.678	0.907	
22.794	1.807	2.000	41.196	20.598	0.904	
22.794	1.800	2.000	41.036	20.518	0.900	
22.794	1.793	2.000	40.877	20.438	0.897	
22.794	1.786	2.000	40.717	20.359	0.894	
22.794	1.779	2.000	40.558	20.279	0.890	

Figura 9.42: Memoria iterativa en MS Excel para análisis de dimensiones generales en unidades SI.  
Fuente: Elaboración propia (2016)

DISEÑO DE UN SEPARADOR AGUA-HIDROCARBUROS DEL TIPO MODULAR PARA CENTRALES DE GENERACIÓN ELÉCTRICA					
RELACIONES ITERATIVAS TAMAÑO DEL SEPARADOR UNIDADES SISTEMA INTERNACIONAL (SI)					
AUTORES: MAURICIO BARRANTES MURILLO B10851					
ALEJANDRO MARTÍNEZ ARANA B03701					
MARCO ANDRÉS RODRÍGUEZ SOLANO B05409					
ANÁLISIS DE TAMAÑO DEL SEPARADOR					
Relación C	D, profundidad (m)	Wc, ancho (m)	L, largo (m)	Relación L/Wc>5	Relación D/Wc entre 0.3 y 0.5
22.794	1.324	2.000	30.186	15.093	0.662
22.794	1.317	2.000	30.027	15.013	0.659
22.794	1.310	2.000	29.867	14.934	0.655
22.794	1.303	2.000	29.708	14.854	0.652
22.794	1.296	2.000	29.548	14.774	0.648
22.794	1.289	2.000	29.389	14.694	0.645
22.794	1.282	2.000	29.229	14.615	0.641
22.794	1.275	2.000	29.070	14.535	0.638
22.794	1.268	2.000	28.910	14.455	0.634
22.794	1.261	2.000	28.750	14.375	0.631
22.794	1.254	2.000	28.591	14.295	0.627
22.794	1.247	2.000	28.431	14.216	0.624
22.794	1.240	2.000	28.272	14.136	0.620
22.794	1.233	2.000	28.112	14.056	0.617
22.794	1.226	2.000	27.953	13.976	0.613
22.794	1.219	2.000	27.793	13.897	0.610
22.794	1.212	2.000	27.634	13.817	0.606
22.794	1.205	2.000	27.474	13.737	0.603

Figura 9.43: Memoria iterativa en MS Excel para análisis de dimensiones generales en unidades SI.  
Fuente: Elaboración propia (2016)

DISEÑO DE UN SEPARADOR AGUA-HIDROCARBUROS DEL TIPO MODULAR PARA CENTRALES DE GENERACIÓN ELÉCTRICA					
RELACIONES ITERATIVAS TAMAÑO DEL SEPARADOR UNIDADES SISTEMA INTERNACIONAL (SI)					
AUTORES: MAURICIO BARRANTES MURILLO B10851					
ALEJANDRO MARTÍNEZ ARANA B03701					
MARCO ANDRÉS RODRÍGUEZ SOLANO B05409					
ANÁLISIS DE TAMAÑO DEL SEPARADOR					
Relación C	D, profundidad (m)	Wc, ancho (m)	L, largo (m)	Relación L/Wc>5	Relación D/Wc entre 0.3 y 0.5
22.794	1.086	2.000	24.762	12.381	0.543
22.794	1.079	2.000	24.602	12.301	0.540
22.794	1.072	2.000	24.442	12.221	0.536
22.794	1.065	2.000	24.283	12.141	0.531
22.794	1.058	2.000	24.123	12.062	0.529
22.794	1.051	2.000	23.964	11.982	0.526
22.794	1.044	2.000	23.804	11.902	0.522
22.794	1.037	2.000	23.645	11.822	0.519
22.794	1.030	2.000	23.485	11.743	0.515
22.794	1.023	2.000	23.326	11.663	0.511
22.794	1.016	2.000	23.166	11.583	0.508
22.794	1.009	2.000	23.006	11.503	0.505
22.794	1.002	2.000	22.847	11.423	0.501
22.794	0.995	2.000	22.687	11.344	0.498
22.794	0.988	2.000	22.528	11.264	0.494
22.794	0.981	2.000	22.368	11.184	0.491
22.794	0.974	2.000	22.209	11.104	0.487

Figura 9.44: Memoria iterativa en MS Excel para análisis de dimensiones generales en unidades SI.  
Fuente: Elaboración propia (2016)

DISEÑO DE UN SEPARADOR AGUA-HIDROCARBUROS DEL TIPO MODULAR PARA CENTRALES DE GENERACIÓN ELÉCTRICA					
HOJA DE CÁLCULO SEPARADOR API CONVENCIONAL UNIDADES SISTEMA INTERNACIONAL (SI)					
AUTORES: MAURICIO BARRANTES MURILLO B10851 ALEJANDRO MARTÍNEZ ARANA B03701 MARCO ANDRÉS RODRÍGUEZ SOLANO B05409					
CONDICIONES DE OPERACIÓN					
Temperatura de Operación, Top	26.66	°C	Presión de Operación, Pop	-	Pa
Temperatura de Diseño, Td	118	°C	Presión de Diseño, Pd	-	Pa
PROPIEDADES DEL FLUIDO					
Gravedad Específica Agua, Sw	0.992	-	Densidad de Agua, pw	996.54	kg/m <sup>3</sup>
Gravedad Específica bunker, So	0.920	-	Densidad de Aceite (Bunker), po	919.44	kg/m <sup>3</sup>
Gravedad, g	9.810	m/s <sup>2</sup>	Viscosidad absoluta del agua, vaw	8.69E-04	N*s/m <sup>2</sup>
Caudal de Mezcla, Qent	20	m <sup>3</sup> /día	Radio de Gotas, ro	0.0075	cm
Caudal de Mezcla, Qent	0.000231	m <sup>3</sup> /s	Radio de Gotas, ro	0.000075	m
DIMENSIONAMIENTO GENERAL					
Profundidad del Canal, d	0.995	m	Relacion Profundidad/Ancho (dfinal/Wc)	0.498	Relación adecuada
Ancho del Canal Separador, Wc	2.000	m	Relacion Largo/Ancho (L/Wc)	1.512	-
Largo, L	3.025	m	Factor de Corto Circuito (Fcc)	1.2	Según API asumir 1.2
CÁLCULOS GENERALES					
CÁLCULO DE VELOCIDADES Y RELACIONES EN SEPARADOR			CÁLCULO DE CANALES		
Veloc. Ascensional. Ley de Stokes, Vas	0.001	m/s	Área Sección Trans Mín Canales, Atc	0.014	m <sup>2</sup>
Velocidad Horizontal Calculada, Vh	0.016	m/s	Número de Canales Metodo 1	0.007	-
Velocidad Horizontal Mínima, Vhmin	0.015	m/s	Número Final de Canales Met 1	1.000	Elige 1 ó 2 Canales
Velocidad Horizontal Utilizada, Vhu	0.015	m/s	Número de Canales Método API	0.0001	-
Relación Vh/Vas	14.01	-	Número Final de Canales API	1.000	Elige 1 ó 2 Canales
Factor de Turbulencia, FT	1.356	-	Profundidad Mínima de Canal, dmin	0.995	m
Factor de Diseño, Fd	1.627	-	Profundidad Final de Canal, dmin (m)	0.995	Sí Cumple Relación d/B
CÁLCULO DE ÁREAS EN SEPARADOR			CEJILLA NIVELADORA Y VERTEDERO		
Área Horiz. Superf. Mínima, Ashmin	0.213	m <sup>2</sup>	Altura Vertedero de Líquido, H (m)	0.967	Valor Adecuado d
Área Horiz. Superf Corregida, Ash	0.346	m <sup>2</sup>	Tiempo de Residencia mezcla, tr (min)	26012.30	-
Área Total del Separador, Ahtot	6.050	m <sup>2</sup>	Longitud ideal del Canal (m)	22.687	m

Figura 9.45: Memoria iterativa en MS Excel para cálculos de dimensiones según ecuaciones en unidades SI. Fuente: Elaboración propia (2016)

DISEÑO DE UN SEPARADOR AGUA-HIDROCARBUROS DEL TIPO MODULAR PARA CENTRALES DE GENERACIÓN ELÉCTRICA					
HOJA DE CÁLCULO DISEÑO DE PLACAS PARALELAS Y BAFLES					
AUTORES: MAURICIO BARRANTES MURILLO B10851 ALEJANDRO MARTÍNEZ ARANA B03701 MARCO ANDRÉS RODRÍGUEZ SOLANO B05409					
CONDICIONES DE OPERACIÓN					
Temperatura de Operación, Top	26.66	°C	Presión de Operación, Pop	-	Pa
Temperatura de Diseño, Td	118	°C	Presión de Diseño, Pd	-	Pa
Caudal de Mezcla, Qent	20	m <sup>3</sup> /día			
Caudal de Mezcla, Qent	0.000231	m <sup>3</sup> /s			
PROPIEDADES DEL FLUIDO					
Gravedad Específica Agua, Sw	0.992	-	Densidad de Agua, uw	996.54	kg/m <sup>3</sup>
Gravedad Específica Bunker, So	0.920	-	Densidad de Aceite (Bunker), uo	919.44	kg/m <sup>3</sup>
Gravedad, g	9.810	m/s <sup>2</sup>	Viscosidad absoluta del agua, vaw	8.69E-04	N <sup>s</sup> /m <sup>2</sup>
Constante, α	1.300	Régimen Laminar	Viscosidad cinemática agua, vw	9.30E-06	m <sup>2</sup> /s
Constante, β	0.060	Material No Unif	Radio de Gotas de hidrocarburo, ro	0.0075	cm
Factor de Fricción, Ff	0.030	Régimen Laminar	Radio de Gotas de hidrocarburo, ro	0.000075	m
DIMENSIONAMIENTO DE PLACAS PARALELAS					
Largo de Placas Paralelas, Lp	32	cm	Ancho de la Placa, Wp	89.43	cm
Largo de Placas Paralelas, Lp	0.320	m	Ancho de la Placa, Wp	0.894	m
Espesor de Placas, tp	0.318	cm	Inclinación de Placas, Bp	45.00	°
Espesor de Placas, tp	0.003	m	Separación de Placas, Sp	5.000	cm
			Separación de Placas, Sp	0.050	m
CÁLCULOS DE PLACAS PARALELAS Y BAFLES					
CÁLCULO DE VELOCIDADES Y RELACIONES EN SEPARADOR			CANTIDAD DE PLACAS PARALELAS		
Veloc. Crítica de Sedimentación, Vsc	4.650	m/s	Número de Placas (Calculado), Np	11.89	-
Velocidad entre Placas, Vp	0.062	m/s	Número Final de Placas por Baffle, Npf	12.00	-
Número de Reynolds, Nr	335.7	Nr dentro de Rango	TAMAÑO DE CADA BAFLE EN SEPARADOR		
CÁLCULO DE ÁREA EN PLACAS PARALELAS			Altura del Baffle con Placas, Hbaf	63.63	cm
Área Superficial de Placas, Asp	0.286	m <sup>2</sup>	Altura del Baffle con Placas, Hbaf (m)	0.636	Valor Adecuado Hbaffle
Área Superficial del Separador	0.004	m <sup>2</sup>	Largo del Baffle con Placas, Lbaf	30.46	cm
Largo de la Placa Paralela Corroborado	0.320	m	Largo del Baffle con Placas, Lbaf	0.305	m

Figura 9.46: Memoria iterativa en MS Excel para cálculos de placas paralelas en unidades SI. Fuente: Elaboración propia (2016)

DISEÑO DE UN SEPARADOR AGUA-HIDROCARBUROS DEL TIPO MODULAR PARA CENTRALES DE GENERACIÓN ELÉCTRICA					
HOJA DE CÁLCULO TUBERÍAS ENTRADA Y SALIDA					
AUTORES: MAURICIO BARRANTES MURILLO B10851 ALEJANDRO MARTÍNEZ ARANA B03701 MARCO ANDRÉS RODRÍGUEZ SOLANO B05409					
CONDICIONES DE OPERACIÓN					
Caudal de Mezcla, Qent	20	m <sup>3</sup> /día	Temperatura de Operación, Top	26.66	°C
Caudal de Mezcla, Qent	0.00023148	m <sup>3</sup> /s	Temperatura de Diseño, Td	118	°C
PROPIEDADES DEL FLUIDO					
Gravedad Específica Agua, Sw	0.992	-	Densidad de Agua, uw	996.5	kg/m <sup>3</sup>
Gravedad Específica Bunker, So	0.920	-	Densidad de Aceite (Bunker), uo	919.4	kg/m <sup>3</sup>
Gravedad, g	9.810	m/s <sup>2</sup>	Viscosidad absoluta del agua, vaw	8.69E-01	N <sup>2</sup> /m <sup>2</sup> s
Radio de Gotas de hidrocarburo, ro	0.0075	cm	Viscosidad cinemática agua, vw	9.30E-06	m <sup>2</sup> /s
Radio de Gotas de hidrocarburo, ro	0.000075	m	Factor de Fricción, Ff	0.03	Régimen Laminar
DIMENSIONAMIENTO DE TUBERÍAS CÉDULA 40 MANUAL CRANE					
Velocidad de diseño de tuberías, Vd	2	m/s	DIÁMETRO 1 MÁXIMO OBTENIDO DE TABLAS PARA RANGO		
Diametro con Vdiseño, D	0.012	m	D. interior más cercano, [tablas], di1	12.50	mm
Diametro con Vdiseño, D	12.14	mm	D. interior más cercano, [tablas], di1	0.013	m
Diametro con Vdiseño, D	0.478	in	D. exterior [tablas], de1	17.10	mm
			Espesor [tablas], t1	1.310	mm
			Mérida Nominal de Tubería, NPS	0.375	in
			Veloc real p/ diámetro máx, di1 (m/s)	1.886	Dentro de Rango
			DIÁMETRO 2 MÍNIMO OBTENIDO DE TABLAS PARA RANGO		
			D. interior más cercano, [tablas], di2	9.200	mm
			D. interior más cercano, [tablas], di2	0.0092	m
			D. exterior [tablas], de2	13.70	mm
			Espesor [tablas], t2	2.240	mm
			Mérida Nominal de Tubería, NPS	0.250	in
			Veloc real p/ diámetro mín, di2 (m/s)	3.482	Dentro de Rango

Figura 9.47: Memoria iterativa en MS Excel para cálculos de tuberías en unidades SI. Fuente: Elaboración propia (2016)

CÁLCULO DE DIÁMETRO ÓPTIMO PARA TUBERÍA DE ENTRADA Y SALIDA					
Velocidad de entrada en separadores según Norma API 421 un rango de (0.0508 - 0.1016) m/s ó (10 - 20) ft/min					
DIÁMETRO ÓPTIMO MÁXIMO PARA ENTRADA Y SALIDA SEPARADOR			DIÁMETRO ÓPTIMO MÍNIMO PARA ENTRADA Y SALIDA SEPARADOR		
Velocidad óptima, Vopt1	0.051	m/s	Velocidad óptima, Vopt2	0.102	m/s
Diametro óptimo con Vopt, Dopt	0.076	m	Diametro óptimo con Vopt, Dopt	0.054	m
Diametro óptimo con Vopt, Dopt	76.2	mm	Diametro óptimo con Vopt, Dopt	53.86	mm
Mérida Nominal de Tubería, NPS	2.999	in	Mérida Nominal de Tubería, NPS	2.120	in
Mérida Nominal de Tubería, NPS	3	in	Mérida Nominal de Tubería, NPS	2.200	in
SE ELIGE DIÁMETRO ÓPTIMO NPS = 3in					
DIMENSIONAMIENTO Y CÁLCULO DE LOS JETS EN LA ENTRADA DEL SEPARADOR					
DISEÑO DE JETS CON DIÁMETRO ÓPTIMO MÁXIMO NPS = 3 in			DISEÑO DE JETS CON DIÁMETRO ÓPTIMO MÍNIMO NPS = 2.2 in		
Diametro óptimo con Vopt, Dopt	0.076	m	Diametro óptimo con Vopt, Dopt	0.054	m
Diametro óptimo con Vopt, Dopt	76.17	mm	Diametro óptimo con Vopt, Dopt	53.86	mm
Mérida Nominal de Tubería, NPS	2.999	in	Mérida Nominal de Tubería, NPS	2.120	in
Mérida Nominal de Tubería, NPS	3	in	Mérida Nominal de Tubería, NPS	2.2	in
D+1	4	in	D+1	3.2	in
Factor de distancia jet, Fjet	0.6	-	Factor de distancia jet, Fjet	0.6	-
Distancia de Jet, djjet	1.8	in	Distancia de Jet, djjet	1.8	in
Diámetro orificio de Jet, d	0.980	in	Diámetro orificio de Jet, d	0.784	in
D+0.0254	0.102	m	D+0.0254	0.079	m
Factor de distancia jet, Fjet	0.6	-	Factor de distancia jet, Fjet	0.6	-
Distancia de Jet, djjet	0.061	m	Distancia de Jet, djjet	0.048	m
Diámetro orificio de Jet, d	0.025	m	Diámetro orificio de Jet, d	0.019	m
Diámetro orificio de Jet, d	24.88	mm	Diámetro orificio de Jet, d	19.41	mm
SE ELIGE ESTE JET DADA LA ELECCIÓN DE NPS = 3 in					

Figura 9.48: Memoria iterativa en MS Excel para cálculos de tuberías en unidades SI. Fuente: Elaboración propia (2016)

DISEÑO DE UN SEPARADOR AGUA-HIDROCARBUROS DEL TIPO MODULAR PARA CENTRALES DE GENERACIÓN ELÉCTRICA					
HOJA DE CÁLCULO COSTOS RELACIONADOS					
AUTORES: MAURICIO BARRANTES MURILLO B10851 ALEJANDRO MARTÍNEZ ARANA B03701 MARCO ANDRÉS RODRÍGUEZ SOLANO B05409					
COSTOS RELACIONADOS BOMBAS PARA RECOLECCIÓN					
Componente	Cantidad	Precio unitario Colones c	Precio final Colones c	Precio unitario Doláres (\$)	Precio final Doláres (\$)
Bomba para recolección de lodos de fondo	2	3,091,200.00	6,182,400.00	5,520.00	11,040.00
Bomba para recolección de hidrocarburos	2	2,570,400.00	5,140,800.00	4,590.00	9,180.00
		<b>Total</b>	<b>11,323,200.00</b>		<b>20,220.00</b>
COSTOS RELACIONADOS DETECTORES DE NIVEL					
Componente	Cantidad	Precio unitario Colones c	Precio final Colones c	Precio unitario Doláres (\$)	Precio final Doláres (\$)
Detector de nivel de agua	2	196,000.00	392,000.00	350.00	700.00
Detector de nivel de hidrocarburos	2	328,160.00	656,320.00	1,172.00	1,172.00
		<b>Total</b>	<b>1,048,320.00</b>		<b>1,872.00</b>
COSTOS RELACIONADOS TUBERÍAS, VÁLVULAS Y ACCESORIOS					
Componente	Cantidad	Precio unitario Colones c	Precio final Colones c	Precio unitario Doláres (\$)	Precio final Doláres (\$)
PVC Tubo sanitario SDR 41, 50mm (2") x metro lineal	10	1,800.00	18,000.00	3.21	32.14
PVC Tubo sanitario SDR 41, 75mm (3") x metro lineal	10	2,800.00	28,000.00	5.00	50.00
PVC Flanger válvula compuerta SCH-80, 75mm	3	9,710.00	29,130.00	17.34	52.02
Válvula de cierre rápido 50mm (2")	6	16,720.00	100,320.00	29.86	179.14
PVC Unión de tope SCH-40, 50mm (2")	1	8,020.00	8,020.00	14.32	14.32
PVC Unión de tope SCH-40, 75mm (3")	1	19,070.00	19,070.00	34.05	34.05
PVC Tee sanitaria, 50mm (2")	2	980.00	1,960.00	1.75	3.50
PVC Tee sanitaria, 75mm (3")	2	3,176.00	6,352.00	5.67	11.34
PVC Codo sanitario 50 mm x 90º	10	687.00	6,870.00	1.23	12.27
PVC Codo sanitario 75 mm x 90º	10	1,800.00	18,000.00	3.21	32.14
		<b>Total</b>	<b>235,722.00</b>		<b>420.93</b>

Figura 9.49: Memoria electrónica en MS Excel para cálculos de costos relacionados. Fuente: Elaboración propia (2016)

COSTOS RELACIONADOS MATERIALES DE FABRICACIÓN Y RECUBRIMIENTO					
Componente	Cantidad	Precio unitario Colones c	Precio final Colones c	Precio unitario Doláres (\$)	Precio final Doláres (\$)
Lámina ASTM A-36 1220 mm x 2440 mm	18	130,000.00	2,340,000.00	232.14	4,178.57
Perfil Viga 6" x 25 lb/ft	4	100,000.00	400,000.00	178.57	714.29
Recubrimiento epóxico Hempel	8	60,000.00	480,000.00	107.14	857.14
		<b>Total</b>	<b>3,220,000.00</b>		<b>5,750.00</b>
COSTOS RELACIONADOS ELEVADORES, AISLAMIENTO TÉRMICO Y RESISTENCIAS					
Componente	Cantidad	Precio unitario Colones c	Precio final Colones c	Precio unitario Doláres (\$)	Precio final Doláres (\$)
Elevador para extracción de baffles	1	300,000.00	300,000.00	535.71	535.71
Aislamiento térmico ALUBLOCK	1	332,235.00	332,235.00	593.28	593.28
Calentadores o resistencias térmicas	8	20,000.00	160,000.00	35.71	285.71
		<b>Total</b>	<b>792,235.00</b>		<b>1,414.71</b>

Figura 9.50: Memoria electrónica en MS Excel para cálculos de costos relacionados. Fuente: Elaboración propia (2016)

COSTOS RELACIONADOS TOTALES DEL SEPARADOR		
Costo total relacionado	Precio total Colones c	Precio total Doláres (\$)
Bombas para recolección	11,323,200.00	20,220.00
Detectores de nivel	1,048,320.00	1,872.00
Tuberías, válvulas y accesorios	235,722.00	420.93
Materiales y recubrimiento	3,220,000.00	5,750.00
Elevadores, aislamiento y resistencias	792,235.00	1,414.71
<b>Total</b>	<b>16,619,477.00</b>	<b>29,677.64</b>

Figura 9.51: Memoria electrónica en MS Excel para cálculos de costos relacionados. Fuente: Elaboración propia (2016)