

**DISEÑO DE UNA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUA CON FUNCIONALIDAD
MÓVIL PARA MARES Y OCÉANOS CONTAMINADOS POR DERRAMES DE TIPO
OLEOSO.**

PEDRO LUIS SOLÓRZANO RIVERO

**Proyecto integral de grado para optar al título de
INGENIERO QUÍMICO**

Orientador

Javier Alexander Mancera Apolinar

Ingeniero Químico

FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA

FACULTAD DE INGENIERÍAS

PROGRAMA DE INGENIERÍA QUÍMICA

BOGOTÁ D.C.

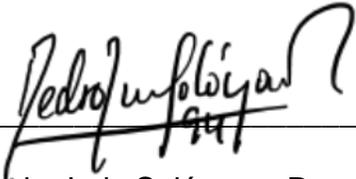
2024

NOTA DE ACEPTACIÓN



Javier Alexander Mancera Apolinar

Firma del Director



Pedro Luis Solórzano Reyes

Firma del Codirector

Nombre

Firma del Presidente Jurado

Nombre

Firma del Presidente Jurado

Nombre

Firma del Presidente Jurado

Bogotá D.C. Noviembre de 2023

DIRECTIVOS DE LAS UNIVERSIDAD

Presidente de la Universidad y Rector del Claustro

Dr. Mario Posada García-Peña

Consejero Institucional

Dr. Luis Jaime Posada García-Peña

Vicerrectora Académica

Dra. María Fernanda Vega de Mendoza

Vicerrector Administrativo y Financiero

Dr. Ricardo Alfonso Peñaranda Castro

Vicerrectora de Investigaciones y Extensión

Dra. Susan Margarita Benavides Trujillo

Secretario General

Dr. José Luis Macías Rodríguez

Decana de la Facultad de Ingenierías

Dra. Naliny Guerra Prieto

Directora del Programa de Ingeniería Química

Ing. Nubia Liliana Becerra Ospina

Las directivas de la Universidad de América, los jurados calificadores y el cuerpo docente no son responsables por los criterios e ideas expuestas en el presente documento. Estos corresponden únicamente a los autores.

DEDICATORIA

Este trabajo se lo dedico a mi padre, que siempre dispuso su tiempo para escuchar mis problemas; a mi madre, que siempre escuchaba con ganas lo que iba aprendiendo; a mi hermano que, a pesar de no ser un tema de su interés, me escuchaba cuando lo necesitaba; a mi abuela, con la que puedo hablar sin contenerme, su interés en el tema siempre fue motivador; a mi director, que disponía tanto tiempo cada semana para resolver problemas; y a mis amigos, por su incondicional soporte emocional, sin ellos no habría llegado tan lejos.

AGRADECIMIENTOS

Mi más sincero agradecimiento a mi padre, que fue más allá de su papel de codirector y me ayudó en cada etapa del proceso tanto como pudo.

Un gran agradecimiento a mi madre, que siempre estuvo dispuesta a escucharme y ayudarme a resolver inquietudes.

Extraordinario agradecimiento a mi director, cuya paciencia es inmensurable, que siempre estaba dispuesto a escuchar todas mis ideas y guiarme en la dirección correcta.

Quiero agradecer personalmente a los profesores Yovanny Morales y Luis Izquierdo, que aportaron su tiempo y extenso conocimiento para el desarrollo de uno de los capítulos.

Un agradecimiento especial a Aidan Wimshurst del canal de YouTube, Fluid Mechanics 101, sin sus explicaciones no hubiese entendido lo que está detrás de la simulación.

TABLA DE CONTENIDO

	pág.
RESUMEN	12
INTRODUCCIÓN	13
1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	18
1.1. Antecedentes	18
1.1.1. <i>¿Quién limpia los derrames?</i>	18
1.1.2. <i>¿Qué métodos y técnicas existen?</i>	18
1.1.3. <i>¿Cuáles son los límites de los métodos y técnicas actuales?</i>	20
1.1.4. <i>¿Existe tecnología marítima con funcionalidad similar?</i>	21
1.2. Pregunta de investigación	21
1.3. Justificación	21
1.4. Delimitación	23
1.4.1. <i>Diseño mecánico</i>	24
1.4.2. <i>Simulación</i>	24
1.4.3. <i>Diseño de planta</i>	24
1.5. Objetivo general	24
1.6. Objetivos específicos	24
2. CONCEPTO	25
2.1. Concepto original	25
2.2. Concepto actualizado	28
2.2.1. <i>Tipo de barco</i>	29
2.2.2. <i>Equipamiento</i>	30
3. MARCO TEÓRICO	32
3.1. Categorías de tanqueros	32
3.2. Tipos de derrames	32
3.3. Categorías de derrames	34
3.4. Tratamiento de aguas residuales	34
3.5. Procesos de separación	36
3.6. Ecuaciones de CFD	40
4. MARCO CONCEPTUAL	42
4.1. Sustancias	42
4.2. Software	42
5. METODOLOGÍA	44
5.1. Diseño de la unidad (UCS)	46
5.2. Software de simulación CFD	46

5.3.	Diagramas BFD, PFD y P&ID	46
5.4.	Costos	47
6.	DISEÑO DE PROCESO	48
6.1.	Diagrama BFD	48
6.2.	Diagrama PFD	54
7.	DISEÑO DE EQUIPO	61
7.1.	Condiciones de diseño	61
7.2.	Diseño original	62
7.3.	Evolución del diseño	64
7.4.	Diseño seleccionado	69
7.5.	Simulación de escenarios	72
	7.5.1. <i>¿Qué son los escenarios?</i>	72
	7.5.2. <i>Mallado</i>	79
	7.5.3. <i>Configuración del modelo</i>	81
7.6.	Análisis de resultados	95
	7.6.1. <i>Simulaciones</i>	95
	7.6.2. <i>Resultados principales</i>	95
	7.6.3. <i>Resultados adicionales</i>	102
8.	DISEÑO DE PLANTA	107
8.1.	Diagrama P&ID	107
8.2.	Lazos de control	116
8.3.	Tuberías	121
	8.3.1. <i>Ecuaciones</i>	121
	8.3.2. <i>Divisiones</i>	121
8.4.	Disposición de equipos (Layout)	127
8.5.	Mantenimiento	133
8.6.	Costos	135
	8.6.1. <i>Bondad financiera</i>	140
	8.6.2. <i>Análisis financiero</i>	144
9.	CONCLUSIONES	147
	BIBLIOGRAFÍA	152
	ANEXOS	165

LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 1. Derrames más grandes registrados alrededor de Estados Unidos.	15
Figura 2. Localización de los 20 mayores derrames de tanqueros.	16
Figura 3. Impactos negativos en la salud mental de los residentes costeros del Golfo de México luego del derrame de petróleo de Deepwater Horizon.	17
Figura 4. El MultiSkimmer MS 30 de Markleen.	19
Figura 5. MOS Sweeper.	20
Figura 6. Containerized / Mobile Water Treatment Systems CWT.	22
Figura 7. Containerized Membrane BioReactor Wastewater Treatment System.	23
Figura 8. Ejemplo de barco catamarán.	25
Figura 9. Boceto de catamarán en movimiento de recolección y esquema de unidad de acopio.	26
Figura 10. Boceto de operación de recolección.	27
Figura 11. Esquema original de disposición de equipos.	28
Figura 12. Esquema y ejemplo de buque de asalto anfibia.	29
Figura 13. Boceto de catamarán con abertura anfibia en la proa.	30
Figura 14. Esquema de separador esférico.	37
Figura 15. Esquema de separador bifásico vertical.	38
Figura 16. Esquema de separador trifásico horizontal.	39
Figura 17. Ecuaciones Navier-Stokes para continuidad, momento en cada componente, y energía.	41
Figura 18. Diagrama de bloque de la metodología.	45
Figura 19. Diagrama de flujo de bloques.	49
Figura 20. Ilustración conceptual del “Roll Filter”.	49

Figura 21. Gráfica de contenido de aceite en el efluente vs dosis de coagulante inorgánico.	51
Figura 22. Mezclador tubular Statiflo.	52
Figura 23. Filtro de agua plisado.	53
Figura 24. Diagrama de Flujo de Proceso (PFD).	54
Figura 25. Diagrama de flujo de proceso – Primera parte.	55
Figura 26. Diagrama de flujo de proceso – Segunda parte.	57
Figura 27. Diagrama de flujo de proceso – Tercera parte.	58
Figura 28. Diagrama de flujo de proceso – Cuarta parte.	59
Figura 29. Diseño original de la unidad central de separación (UCS).	63
Figura 30. Diseño original con perspectiva de diésel.	64
Figura 31. Evolución del diseño en 9 imágenes.	65
Figura 32. Clásico experimento físico de tubo en U.	68
Figura 33. Diseño de separador seleccionado tras evolución.	70
Figura 34. Pathlines de secciones 2 y 3 del diseño seleccionado.	71
Figura 35. Líneas delineadoras de zonas NRZ 1 y NRZ 2/Gráfica de resultados NRZ.	76
Figura 36. Código de Python para procesamiento de información de NRZ.	76
Figura 37. Interfaz Volume Integrals y zonas relevantes.	78
Figura 38. Especificaciones del mallado en Ansys Fluent.	80
Figura 39. Mallado final de la superficie del diseño seleccionado.	81
Figura 40. Opciones generales del ambiente de simulación/Propiedades de fluidos.	82
Figura 41. Interfaz de selección de modelo multifase.	83
Figura 42. Interfaz de selección de modelo de viscosidad/Tensiones superficiales.	85
Figura 43. Gráfica de comparación de Standard y Enhanced Wall Treatment.	87

Figura 44. Inflación de celdas cercanas a la pared durante el mallado.	88
Figura 45. Ejemplos de flujos beneficiados de método Non-Equilibrium Wall Functions.	89
Figura 46. Interfaces de inicialización y controles de la solución.	90
Figura 47. Interfaz de monitoreo de residuales.	91
Figura 48. Ecuación para calcular residuales del balance de masa.	92
Figura 49. Interfaz de métodos de solución/Interfaz de parámetros de simulación.	93
Figura 50. Contours de todos los escenarios.	95
Figura 51. Gráfica de eficiencias oil vs composición.	98
Figura 52. Gráficas de resultados primarios.	100
Figura 53. Gráfica de tiempo de llenado de la sección 4 del separador vs composición.	105
Figura 54. Diagrama de tuberías e instrumentación – sección de recolección.	108
Figura 55. Diagrama de tuberías e instrumentación – sección de separación.	110
Figura 56. Diagrama de tuberías e instrumentación – tanque de almacenamiento.	111
Figura 57. Diagrama de tuberías e instrumentación – sección de limpieza (parte 1).	113
Figura 58. Diagrama de tuberías e instrumentación – sección de limpieza (parte 2).	115
Figura 59. Lazos de control propuestos para un sistema automático.	117
Figura 60. Explicación del lazo de control especial.	119
Figura 61. Lazo de control de filtrado final.	120
Figura 62. Gráficas para definir diámetros de tubería óptimos.	127
Figura 63. Boceto de disposición de equipos – primer piso.	128
Figura 64. Boceto de disposición de equipos – segundo piso.	129
Figura 65. Boceto de disposición de equipos – cubierta.	130
Figura 66. Vista Top rediseñada.	131

Figura 67. Boceto primitivo 3D.	132
Figura 68. Conexiones usadas por empresa Hy-Conn Inc.	133
Figura 69. Fracturing Tree.	134
Figura 70. Casa de “armable” de Boxabl.	135
Figura 71. Imagen de catamarán Catana 62.	141
Figura 72. Planteamiento de Programmable Logic Controller (PLC) del Proceso.	149
Figura 73. Diagrama BFD actualizado.	150
Figura 74. Gráficas de selección de coagulante/floculante – Parte 1.	166
Figura 75. Gráficas de selección de coagulante/floculante – Parte 2.	167
Figura 76. Gráficas de selección de coagulante/floculante – Parte 3.	168
Figura 77. Condiciones del balance de masa.	169
Figura 78. Evolución del diseño – Diseño 2.	174
Figura 79. Evolución del diseño – Diseño 3.	175
Figura 80. Evolución del diseño – Diseño 4.	176
Figura 81. Evolución del diseño – Diseño 5.	177
Figura 82. Evolución del diseño – Diseño 6.	178
Figura 83. Evolución del diseño – Diseño 7.	179
Figura 84. Evolución del diseño – Diseño 8.	180
Figura 85. Evolución del diseño – Diseño 9.	181
Figura 86. Evolución del diseño – Diseño 10.	182
Figura 87. Escenarios: Código de Python (Parte 1).	183
Figura 88. Escenarios: Código de Python (Parte 2).	184
Figura 89. Escenarios: Código de Python (Parte 3).	185
Figura 90. Escenarios: 0,5 m/s – 1% Oil.	194

Figura 91. Escenarios: 0,5 m/s – 5% Oil.	195
Figura 92. Escenarios: 0,5 m/s – 10% Oil.	196
Figura 93. Escenarios: 0,5 m/s – 20% Oil.	197
Figura 94. Escenarios: 0,5 m/s – 30% Oil.	198
Figura 95. Escenarios: 1,0 m/s – 1% Oil.	199
Figura 96. Escenarios: 1,0 m/s – 5% Oil.	200
Figura 97. Escenarios: 1,0 m/s – 10% Oil.	201
Figura 98. Escenarios: 1,0 m/s – 20% Oil.	202
Figura 99. Escenarios: 1,0 m/s – 30% Oil.	203
Figura 100. Escenarios: 1,5 m/s – 1% Oil.	204
Figura 101. Escenarios: 1,5 m/s – 5% Oil.	205
Figura 102. Escenarios: 1,5 m/s – 10% Oil.	206
Figura 103. Escenarios: 1,5 m/s – 20% Oil.	207
Figura 104. Escenarios: 1,5 m/s – 30% Oil.	208
Figura 105. Escenarios: 2,0 m/s – 1% Oil (A).	209
Figura 106. Escenarios: 2,0 m/s – 1% Oil (B).	210
Figura 107. Escenarios: 2,0 m/s – 1% Oil (C).	211
Figura 108. Escenarios: 2,0 m/s – 5% Oil (A).	212
Figura 109. Escenarios: 2,0 m/s – 5% Oil (B).	213
Figura 110. Escenarios: 2,0 m/s – 10% Oil.	214
Figura 111. Escenarios: 2,0 m/s – 20% Oil.	215
Figura 112. Escenarios: 2,0 m/s – 30% Oil.	216
Figura 113. Escenarios: Resultados Primarios – Potencial Diario vs Composición.	217
Figura 114. Escenarios: Resultados Primarios – Oil/Water Ratio vs Composición.	218

Figura 115. Escenarios: Resultados Primarios – Eficiencia Water vs Composición.	219
Figura 116. Escenarios: Resultados Secundarios – Tiempo de llenado vs Composición.	220
Figura 117. Escenarios: Resultados Secundarios – NRZ 1 vs Composición.	221
Figura 118. Escenarios: Resultados Secundarios – NRZ 2 vs Composición.	222
Figura 119. Propiedades de fluidos – Agua.	223
Figura 120. Propiedades de fluidos – Diésel.	224
Figura 121. Propiedades de fluidos – Aire.	225
Figura 122. P&ID – Gráficas de selección de diámetros de tuberías (Pool IN).	227
Figura 123. P&ID – Gráficas de selección de diámetros de tuberías (Separators IN).	228
Figura 124. P&ID – Gráficas de selección de diámetros de tuberías (Separators WT OUT).	229
Figura 125. P&ID – Gráficas de selección de diámetros de tuberías (Separators OIL OUT y Reciclo Pool).	230
Figura 126. P&ID – Gráficas de selección de diámetros de tuberías COAG/FLOC System y WT OUT).	231

LISTA DE TABLAS

	pág.
Tabla 1. Escenarios posibles.	72
Tabla 2. Procesamiento de información de las simulaciones.	74
Tabla 3. Resultados de división RESULTADOS.	97
Tabla 4. Eficiencias, potencial diario (barriles) y oil/water ratio promedios.	102
Tabla 5. Resultados de división POST SIM.	103
Tabla 6. Tabla para cálculo de diámetro óptimo de tubería Pool IN.	122
Tabla 7. Tabla para cálculo de diámetro óptimo de tubería Separators IN.	122
Tabla 8. Tabla para cálculo de diámetro óptimo de tubería Separators WT OUT.	124
Tabla 9. Tabla para cálculo de diámetro óptimo de tubería Separators OIL OUT y reciclo POOL.	125
Tabla 10. Tabla para cálculo de diámetro óptimo de tubería COAG/FLOC System y WT OUT.	126
Tabla 11. Tabla de costos de equipos principales.	136
Tabla 12. Tabla de costos de equipos auxiliares y accesorios de 19" de diámetro.	137
Tabla 13. Tabla de costos de equipos auxiliares y accesorios de 11" de diámetro.	138
Tabla 14. Tabla de costos de equipos auxiliares y accesorios de 4" de diámetro.	139
Tabla 15. Tabla de costos de equipos auxiliares y accesorios de 3" de diámetro.	140
Tabla 16. Dimensiones y especificaciones del Catana 62.	141
Tabla 17. Resumen de costos de inversión y operación.	142
Tabla 18. Tabla de Ingresos y Egresos.	142
Tabla 19. Tabla de definición del TIO.	143
Tabla 20. Tabla de indicadores de bondad financiera.	143
Tabla 21. Velocidades recomendadas según composición.	148

Tabla 22. Balance de masa.	170
Tabla 23. Escenarios – PRE SIM.	186
Tabla 24. Escenarios – POST SIM – NO RETURN ZONES.	188
Tabla 25. Escenarios – POST SIM – LAST SECTION (AREA).	190
Tabla 26. Escenarios – EFICIENCIA DEL PROCESO.	192
Tabla 27. Tanque de almacenamiento TK-100.	232
Tabla 28. Tanque de almacenamiento TK-101.	233
Tabla 29. Tanque de alimentación por gravedad TK-102.	234
Tabla 30. Tanque Pool V-100.	235
Tabla 31. Tanque de recolección V-101.	236
Tabla 32. Tanque de floculación V-102.	237
Tabla 33. Separador S-100.	238
Tabla 34. Separador S-101.	239
Tabla 35. Separador S-102.	240
Tabla 36. Separador S-103.	241

RESUMEN

Este documento presenta el diseño conceptual parcial de una planta de tratamiento de agua cuya construcción se pretende en el interior de un barco, con el objetivo de originar la idea de una herramienta integral para la limpieza de algunos tipos de derrames aceitosos en mares y océanos; el diseño está intencionado a ser escalable para cubrir diferentes cuerpos de agua en un futuro. Un diseño de planta consta de 12 documentos, pero con el propósito de garantizar la transmisión de la idea, se desarrollaron 6 claves: filosofía de diseño, diseño de proceso mediante diagrama PFD, diseño de planta mediante diagrama P&ID, una breve descripción del diseño funcional, bocetos de la disposición de equipos, y un simplificado análisis de bondad financiera para evaluar la factibilidad.

Este proyecto apuntaba a la recolección de 50.000 barriles de aceites ligeros y/o pesados en un plazo de 16 días. Con el diseño propuesto, los resultados indicaron que es posible recolectar un promedio teórico de 556.800 barriles en ese tiempo, lo que equivale a 11 veces el planteamiento original; a partir de este valor es viable el escalado para aplicar a diferentes tamaños de derrame.

Adicionalmente, se planteó una nueva propuesta de modelo de separador trifásico para implementación en el barco; su funcionalidad fue estudiada a partir de simulaciones de CFD (Dinámica de Fluidos Computacional) usando la versión estudiantil del software Ansys Fluent. Los resultados indicaron una aproximada eficiencia del 97%, con oportunidad de mejora en el ámbito de diseño y de la simulación.

PALABRAS CLAVE: planta de tratamiento de agua, barco, aceites ligeros y pesados, limpieza de derrames, separador trifásico, simulación, CFD.

INTRODUCCIÓN

Los combustibles fósiles han existido por miles de años, habiendo registros de su uso incluso en el año 4000 B.C, sin embargo, no fue sino hasta los siglos 18 y 19 que se empezaron a usar de forma masiva por la población mundial gracias a su capacidad de proveer calor al quemarlo con oxígeno [1]. En este sentido se estableció un ciclo de crecimiento en su demanda y consumo, que persiste en la actualidad, por ello, además de utilizar pozos de petróleo en tierra, fueron desarrolladas perforaciones sobre aguas, que iniciaron en Ohio, Estados Unidos, en 1891 [2]. Desde entonces, cientos de perforaciones marítimas fueron desarrolladas, y en los últimos 12 años, en promedio existen 250 plataformas activamente operando cada año a nivel mundial, con el mínimo de 174 plataformas en el año 2020 [3].

Por otro lado, debido a que muchos países no pueden producir suficiente petróleo, o producirlo siquiera, necesitan importarlo. De la misma manera, otros países lo utilizan como fuente de trabajo y riqueza, dado que es un *commodity*. Cuando el importador se encuentra a través del océano del exportador, el único medio de transporte es a través de barcos, éstos obtienen el nombre “tanqueros” derivado del término en inglés “*oil tankers*” [4].

¿Cuál es la relación y relevancia entre plataformas marítimas y tanqueros?

Ambos operan activamente en los grandes deltas, mares y océanos, manejando cantidades muy altas de petróleo. Cada vez que ocurren errores humanos, equipos se averían o rompen, desastres naturales (como filtraciones de petróleo naturales, también conocido como “*natural oil seeps*” [5]) o incluso vertimientos ilegales [6], se hace presente el infame término derrame de petróleo o “*oil spill*”. Uno de los derrames más antiguos registrados ocurrió en 1969 en Santa Barbara, California, Estados Unidos, y se estima que unos 100.000 barriles (13.600 toneladas métricas) fueron derramadas en el transcurso de 11 días [7]. Desde entonces, ha habido miles de derrames por diferentes fuentes, sean estas plataformas o tanqueros, donde decenas de miles de toneladas métricas de petróleo han sido liberadas en mares y océanos, y a pesar de que el número de derrames se ha reducido notablemente en los últimos años, en 2022 se registró que por parte de los tanqueros únicamente, más de 15.000 toneladas métricas fueron

derramadas [8]. Sin embargo, esta cantidad es poco notable en comparación con los 3 eventos más impactantes en esta área:

- Ixtoc I: En junio 3, 1979, en la Bahía de Campeche, México, debido a una pérdida de circulación del lodo de perforación se produjo una explosión en la plataforma marítima *Ixtoc I*, lo cual hizo que toda la plataforma se incendiara y liberara entre 10.000 y 30.000 barriles por día en el transcurso de 10 meses, que fue lo que duró contener el incendio; esto resultó en más de 3.3 millones de barriles derramados (más de 450.000 toneladas métricas) [9].
- Deepwater Horizon: “El 20 de abril de 2010, la plataforma de perforación petrolera Deepwater Horizon, que operaba en Macondo Prospect en el Golfo de México, explotó y se hundió, provocando la muerte de 11 trabajadores... y el mayor derrame de petróleo en la historia de la perforación petrolera marina”. Tomó 87 días frenarlo y resultó en la liberación de más de 4 millones de barriles (más de 550.000 toneladas métricas) [10].
- Guerra del Golfo: Habiendo derramado más de 240 millones de galones (más de 780.000 toneladas métricas o 5'818.800 barriles), se proclama el peor derrame de petróleo de la historia, es preferible no discutir la identidad del culpable, pero lo que es definitivo es que no fue un desastre natural [11].

Estos 3 eventos por sí solos suman alrededor de 2 millones de toneladas métricas (más de 14 millones de barriles o 615 millones de galones) de petróleo derramado en los mares y océanos de nuestro planeta, hogar que no es sólo nuestro. Para dar un poco más de perspectiva, la Figura 1 muestra los derrames más notorios alrededor de Estados Unidos y su magnitud.

Por otra parte, mayores derrames de tanqueros registrados tienen un foco más notable en el otro lado del globo, como puede apreciarse en la Figura 2.

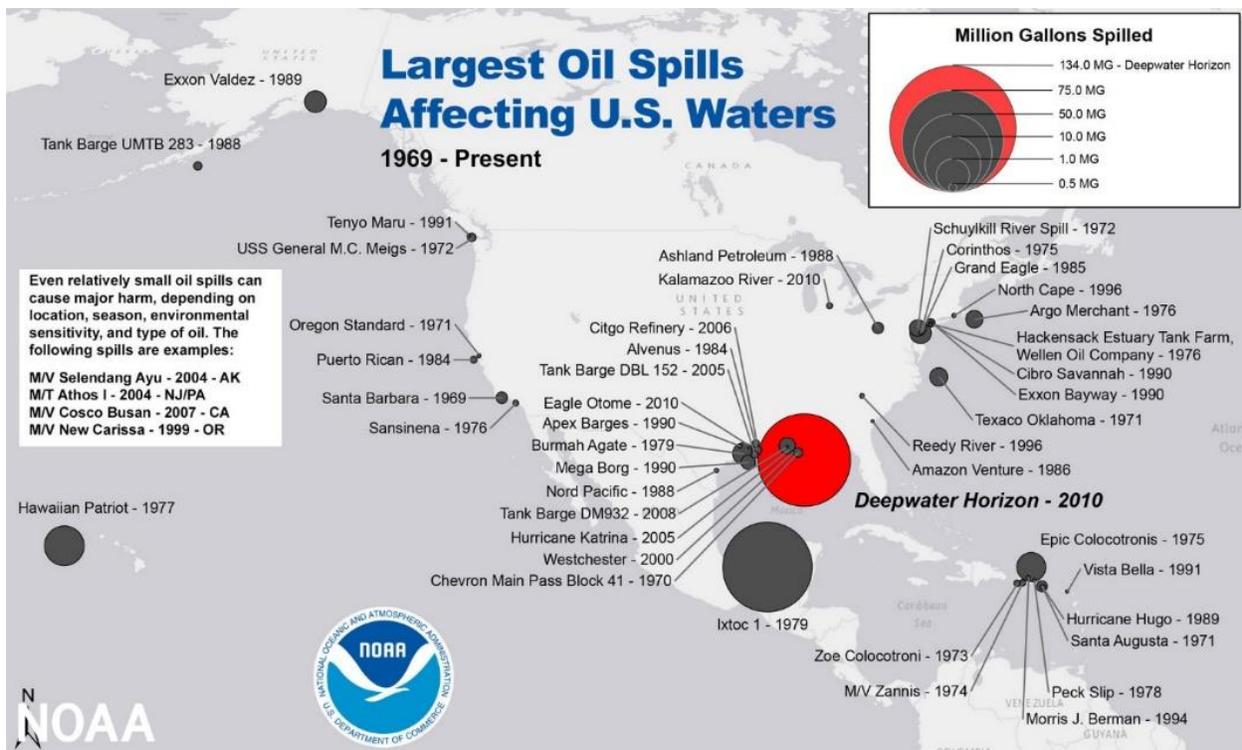
¿Por qué son malos los derrames?

Los derrames pueden causar daño a la vida marina, ya sea por engrasado (grosa traducción del término en inglés “*oiling*”), donde plantas o animales son dañados físicamente por contacto con la sustancia, o alternamente por toxicidad, ya que el petróleo está conformado por diversos compuestos que por sí solos son tóxicos para

muchas formas de vida. El engrasado, también conocido como abordaje (grosa traducción del término en inglés “*fouling*”) "puede cubrir las alas de un pájaro y dejarlo incapaz de volar o quitarle las propiedades aislantes del pelaje de una nutria marina, poniéndolo en riesgo de hipotermia", mientras que la toxicidad del petróleo "puede causar graves problemas de salud como daño cardíaco, retraso en el crecimiento, problemas del sistema inmunológico, e incluso la muerte" [12].

Figura 1.

Derrames más grandes registrados alrededor de Estados Unidos.



Nota. La cifra hace referencia únicamente a los mayores derrames de petróleo en Norte América. También los divide en diferentes categorías dependiendo de los millones de galones derramados (MG). Tomado de: National Oceanic and Atmospheric Association, Oil spills, [En línea]. Disponible: <https://www.noaa.gov/education/resource-collections/oceancoasts/oilspills#:~:text=Thousands%20of%20oil%20spills%20occur,beaches%2C%20mangroves%2C%20and%20wetlands.> [Accedido: feb.05.2023]

Figura 2.

Localización de los 20 mayores derrames de tanqueros.

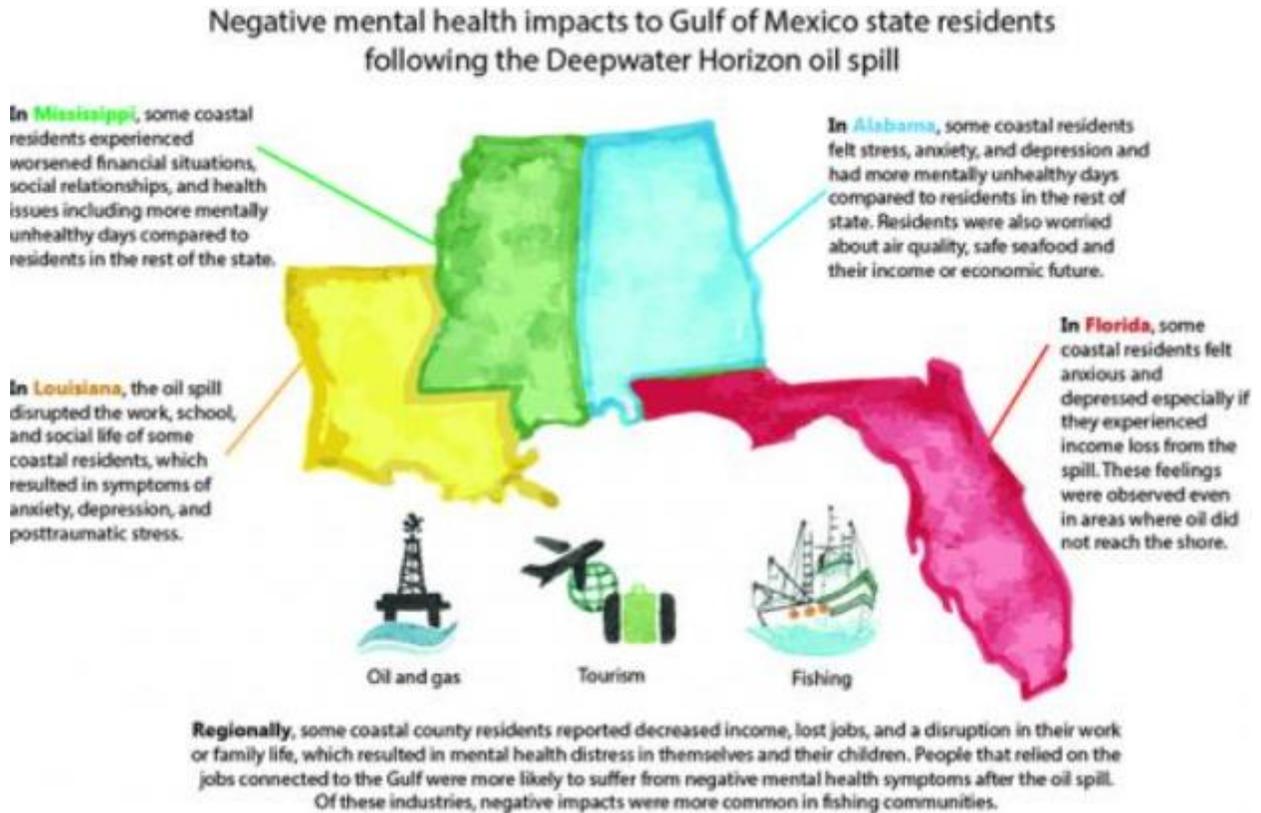


Nota. La Figura hace referencia a los 20 principales derrames de petroleros según la *International Tanker Owners Pollution Federation Limited* (ITOPF), la imagen tiene una escala para las cantidades derramadas en miles de toneladas métricas. Tomado de: ITOPF, Oil tanker spill statistics 2022, [En línea]. Disponible: <https://www.itopf.org/knowledge-resources/data-statistics/statistics/> [Accedido: feb.05.2023]

Eso no serían todos los impactos, los derrames son también terribles para la sociedad. El derrame de Deepwater Horizon tuvo un gran impacto en la salud mental y calidad de vida de los residentes costeros del Golfo de México, no sólo por factor visual tras ver playas inundadas de petróleo, lo cual causaba ansiedad e incluso depresión en algunos casos, sino también en términos de sus trabajos, pues muchos sufrieron impacto negativo en sus ingresos ya que sus negocios involucraban pesca, turismo, y entre otros [13]. Para ilustrar un poco mejor los efectos de este **único** evento en la vida de los residentes costeros, la Figura 3 presenta las conclusiones de un estudio hecho en Louisiana, Mississippi, Alabama y Florida, del país Estados Unidos.

Figura 3.

Impactos negativos en la salud mental de los residentes costeros del Golfo de México luego del derrame de petróleo de Deepwater Horizon.



Nota. Esta información fue proporcionada por un equipo de especialistas en divulgación científica sobre derrames de petróleo de Tara Skelton. Tomado de: NOAA/Office of Response and Restoration, Coping in the aftermath of Deepwater Horizon, [En línea]. Disponible: <https://response.restoration.noaa.gov/about/media/coping-aftermath-deepwater-horizon.html> [Accedido: feb.05.2023]

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1. Antecedentes

En vista de que el proyecto de grado planteado es una innovación, no tiene antecedentes directos, sin embargo, realizando una división del problema en partes es posible una búsqueda de información más específica.

1.1.1. *¿Quién limpia los derrames?*

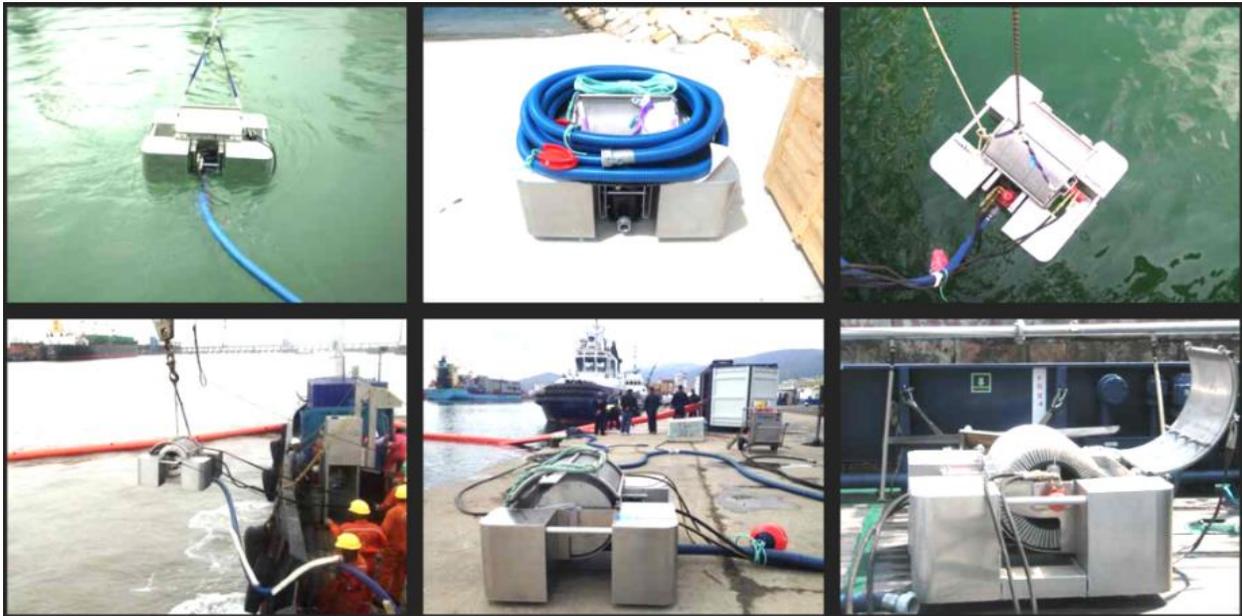
Existen dos entidades claras: El **Office of Response and Restoration (OR&R)** del **NOAA** (Oficina Nacional de Administración Oceánica y Atmosférica, con base en Washington D.C, Estados Unidos), y la empresa **Markleen** de Noruega [14]. El **NOAA** cubre “los pronósticos diarios del clima, las advertencias de tormentas severas y el monitoreo climático hasta la gestión pesquera, la restauración costera y el apoyo al comercio marítimo” [15], mientras que **Markleen** proporciona soluciones de protección ambiental para diferentes escenarios y usos.

1.1.2. *¿Qué métodos y técnicas existen?*

La empresa **Markleen** cuenta con dispositivos complejos como el *MultiSkimmer MS30* [16] (ver Figura 4), y con métodos menos complejos como el uso de redes y flotadores [17] (ver Figura 5). El primero es un aparato de pequeño tamaño y alta eficiencia; es usado en muelles y playas. El uso de redes y flotadores permiten contener el derrame mientras se toman las medidas preventivas para minimizar daños, y permite que barcos recolecten por medio de tubos de succión todo el petróleo que se pueda; en el peor de los casos, el petróleo es simplemente quemado [18], lo cual hasta cierto punto evita mayores daños al ecosistema marino, pero finalmente sigue afectando de forma negativa el planeta. El **NOAA** hace uso de los métodos menos complejos y son los que toman medidas preventivas para proteger comunidades humanas y marinas, así como el ecosistema [19].

Figura 4.

El MultiSkimmer MS 30 de Markleen.



Nota. Skimmer hidráulico de capacidad mediana concebido para uso en aguas exteriores y alta mar. Tomado de: Recuperación Hidrocarburos Multi Skimmers MS 30 | MARKLEEN [En línea]. Disponible: <https://markleen.com/es/soluciones-derrames/skimmers-multi-skimmers-30/> [Accedido: oct.01.2022]

Figura 5.

MOS Sweeper.



Nota. Sistema de barreras en configuración hidrodinámica para la recogida de vertidos de petróleo en el mar. Tomado de: “Técnicas de recuperación y limpieza de derrames de petróleo en el mar: equipos profesionales” [En línea]. Disponible: <https://markleen.com/es/respuestas-derrames/limpieza-derrames-petroleo-mar/> [Accedido: oct.09.2023]

1.1.3. ¿Cuáles son los límites de los métodos y técnicas actuales?

Las mayores limitaciones son tiempo de respuesta y eficiencia de recolección. Es un proceso demorado enviar barcos a la zona de derrame, el proceso de recolección no inicia inmediatamente y cuando empieza, una gran parte del petróleo derramado ya no se puede recuperar, mientras que la otra parte se recupera con baja eficiencia en cuanto a ratio de petróleo/agua en tanque.

1.1.4. ¿Existe tecnología marítima con funcionalidad similar?

Si bien no existe una tecnología que resuelva esta problemática, si existe tecnología que resuelve el problema de los residuos sólidos en océanos y ríos, el *Interceptor* [20]. Desarrollado por **The Ocean Cleanup Technologies B.V**, una empresa holandesa, esta tecnología es precisamente un barco construido con el propósito de recolectar estos residuos, pero se limita a eso, por lo que es relevante reconocer que existe tal tecnología, y sería posible implementar sus métodos al proyecto.

1.2. Pregunta de investigación

¿Es posible diseñar ambos un separador trifásico y una planta de tratamiento de agua instalada en un barco para limpiar dinámicamente mares y océanos de derrames?

1.3. Justificación

La principal justificación es la necesidad, ya que son numerosas las situaciones en que ocurren derrames de sustancias nocivas a la vida acuática y el ecosistema. Debe realizarse en este momento para aprovechar las tendencias mundiales a mejorar el medio ambiente, lo cual facilitaría conseguir inversionistas o empresas que financien la idea, y si no se realizara, en el caso catastrófico que haya otro evento como *Deepwater Horizon* [7], el ecosistema sería incluso más difícil de mantener.

Adicionalmente, hay un motivo desde el punto de vista tecnológico, pues existen toda clase de plantas de tratamiento de agua en el mundo, ya sean de aguas residuales o agua potable, y existen aquellas con el carácter portable, como el “*Containerized / Mobile Water Treatment Systems CWT*” de PURE AQUA, INC [21] (ver Figura 6), para el tratamiento de agua potable, y el “*Mobile Wastewater Treatment Plant*” [22] (ver Figura 7) para el tratamiento de aguas residuales; la diferencia es que estas plantas se pueden transportar, pero su funcionamiento es estrictamente estático, mientras que la planta de tratamiento que se propone como prototipo, tendría la función de operar en forma estática o en movimiento, pues es requerido para garantizar que el derrame se limpie tan pronto como sea posible.

Figura 6.

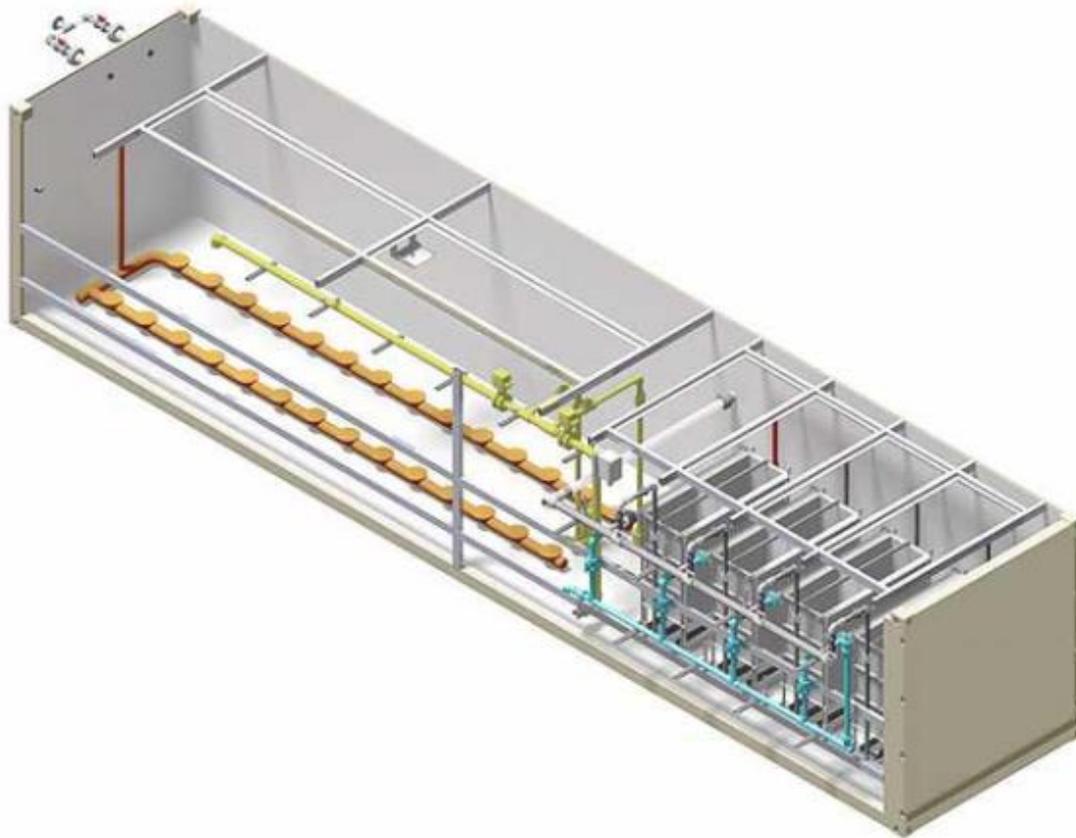
Containerized / Mobile Water Treatment Systems CWT.



Nota. PURE AQUA, INC., es una empresa dedicada a la fabricación de plantas de tratamiento de agua, en numerosas modalidades. Tomado de: Containerized / Mobile Water Treatment Systems CWT [En línea]. Disponible: <https://pureaqua.com/containerized-water-treatment-systems/> [accedido: sep.28.2022]

Figura 7.

Containerized Membrane BioReactor Wastewater Treatment System.



Nota. Este modelo cuenta con un biorreactor de membrana para el tratamiento de aguas residuales. Tomado de: Containerized Membrane BioReactor Wastewater Treatment [En línea]. Disponible: <https://pureaqua.com/mobile-containerized-wastewater-treatment-system/> [accedido: sep.28.2022]

1.4. Delimitación

Es esencial definir con precisión los límites y alcances del proyecto, especificando claramente las tareas **incluidas** y **excluidas**. Esta delimitación garantiza claridad en responsabilidades, evita desviaciones y asegura el cumplimiento eficiente de los objetivos.

1.4.1. Diseño mecánico

Dentro del alcance definido no se incluyó el diseño mecánico del barco o de sus partes. Adicionalmente, esto no es un trabajo inherente de un Ingeniero Químico.

1.4.2. Simulación

La única verdadera limitación es a nivel computacional, pues con el poder de cómputo con el que se cuenta no es posible desarrollar simulaciones de máxima precisión, ya que tomaría meses y años. Por ello, se limitará la precisión a los niveles por defecto.

1.4.3. Diseño de planta

El diseño de la planta constará de 6 documentos técnicos descriptivos:

1. Filosofía del diseño.
2. Diagrama de flujo de proceso (PFD).
3. Diagrama de tuberías e instrumentación (P&ID).
4. Lazos de control.
5. Disposición de equipos (Layout).
6. Estimación de costos.

1.5. Objetivo general

Diseñar una planta de tratamiento de agua móvil para derrames de compuestos de tipo oleoso en mares y océanos.

1.6. Objetivos específicos

1. Diseñar la unidad de separación central del proceso.
2. Simular con CFD el funcionamiento de la unidad central de separación.
3. Diseño conceptual parcial de la planta.

2. CONCEPTO

2.1. Concepto original

Esta idea salió originalmente en 2017 cómo monografía de grado, educación secundaria, los autores y colaboradores de este trabajo son, Pedro Solórzano Reyes y Pedro Solórzano Rivero, con este prototipo; se sustentaba imaginación o concepto de un barco capaz de pasar por una región de agua contaminada por un derrame de hidrocarburos, limpiándola casi por completo. Tras evaluación, se definió en ese tiempo que el tipo de barco ideal para esta tarea era un modelo tipo Catamarán. El motivo sería por su forma, pues su apertura interior permite instalación de un sistema que permita separar el agua del aceite, muy posiblemente usando separación por diferencia de densidades; en la Figura 8 se muestra un ejemplo de un catamarán.

Figura 8.

Ejemplo de barco catamarán.



Nota. Tomado de: Razor Cat 52 Sailing Cat [En línea]. Disponible: <https://www.razorcats.com/razorcat52/> [Accedido: nov.07.23]

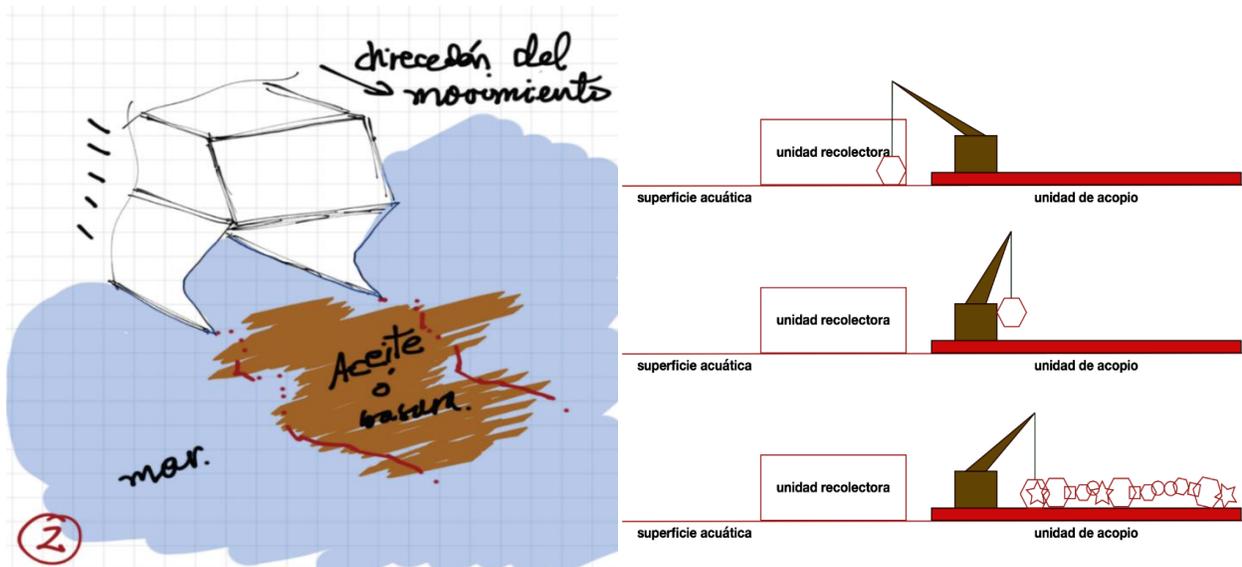
La recolección de los residuos se realizaría con el conjunto de uno o más barcos recolectores en combinación con barcos de acopio mediante un ciclo de operación. El sistema de recolección estaría compuesto en principio por 3 tipos de unidades:

- Unidad de recolección de residuos, capaz de movilizarse sobre los residuos mientras los recolecta.
- Unidad de acopio de líquidos, capaz de almacenar grandes cantidades de aceites y líquidos contaminantes recolectados.
- Barco tanquero, transportador de residuos.

En el boceto de la Figura 9 se muestra una perspectiva de la unidad recolectora moviéndose sobre una mancha de aceite, el mecanismo interno que se adaptaría a esta unidad permitiría recolectar el aceite. En la misma figura a la derecha, se explica la función de la unidad de acopio.

Figura 9.

Boceto de catamarán en movimiento de recolección y esquema de unidad de acopio.



Nota. Originalmente se planteó que también fuese capaz de recoger basura; dibujado por Pedro Solórzano Reyes, en Microsoft OneNote [23]. Adicionalmente contaría con una manguera para extraer el aceite del almacenamiento de la unidad recolectora.

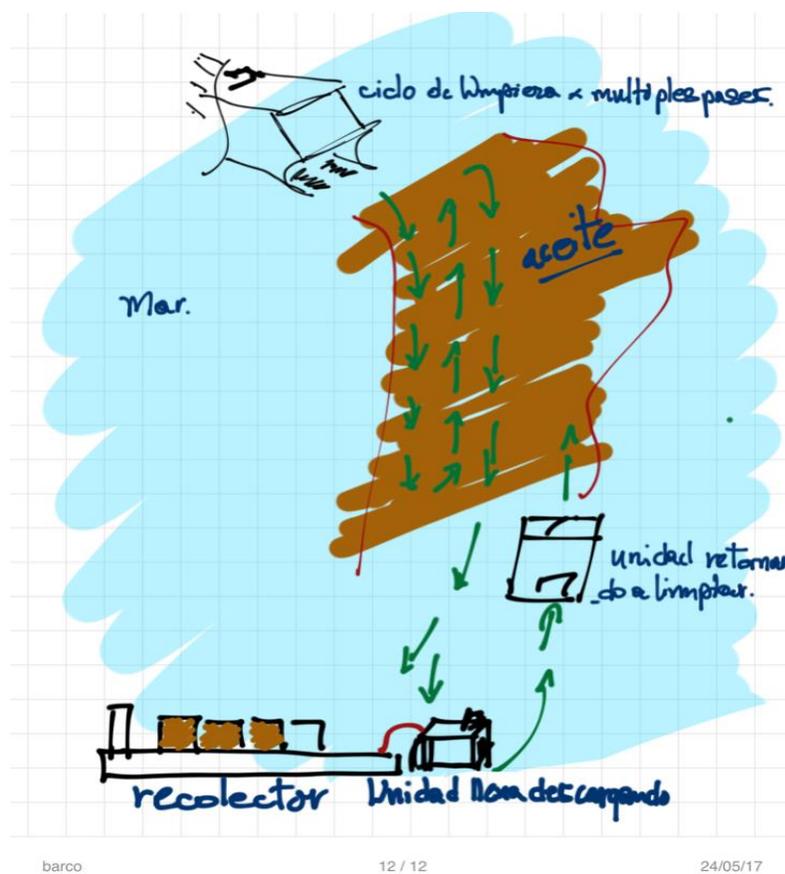
La unidad de acopio se mantiene cerca de la unidad de recolección para rápidamente vaciar el tanque de almacenamiento; la unidad recolectora procede a seguir operación mientras la unidad de acopio deposita el aceite y otros residuos en el barco tanquero, ver Figura 10.

En la Figura 11 se presenta el esquema original de la disposición de equipos. Este diseño requería de constante ayuda de operarios para recoger residuos sólidos atrapados en las mallas.

No es objetivo principal de este trabajo, pero al final se mostrará la re - imaginación de este esquema, ajustado a todas las ideas presentadas.

Figura 10.

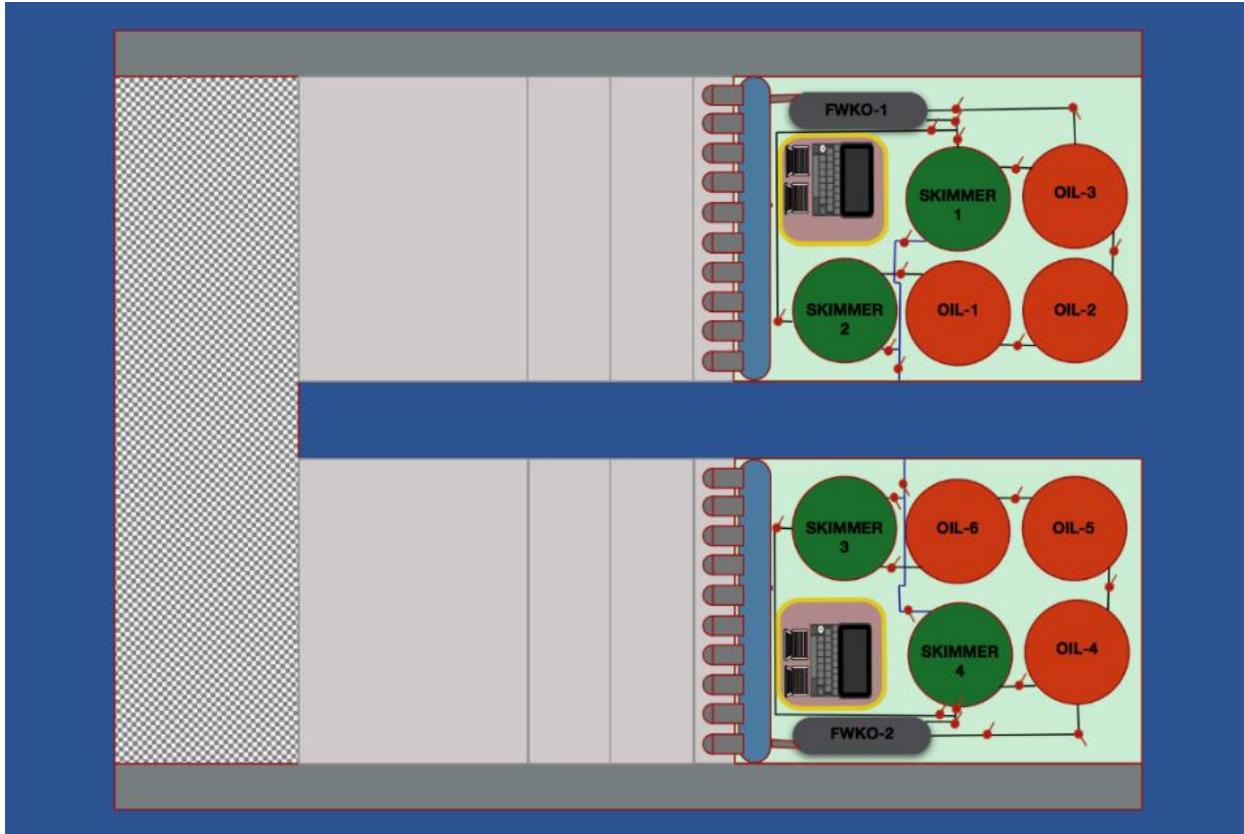
Boceto de operación de recolección.



Nota. Dibujado por Pedro Solórzano Reyes, 2017, en Microsoft OneNote [23].

Figura 11.

Esquema original de disposición de equipos.



Nota. Extraído del trabajo original: “Diseño de un prototipo primitivo de un barco recolector de desechos líquidos superficiales en aguas abiertas”, descripción: “La entrada interna del barco tendría mallas y tamices ubicados al nivel de las aguas, por tanto, el material subiría a estas y luego caería en trampas, que separarían el agua, permitiendo a las máquinas de la unidad comenzar a procesar los residuos líquidos.” Esquemático por Pedro Solórzano Reyes.

2.2. Concepto actualizado

La idea permanece en gran parte, pero se añade y/o modifica lo siguiente:

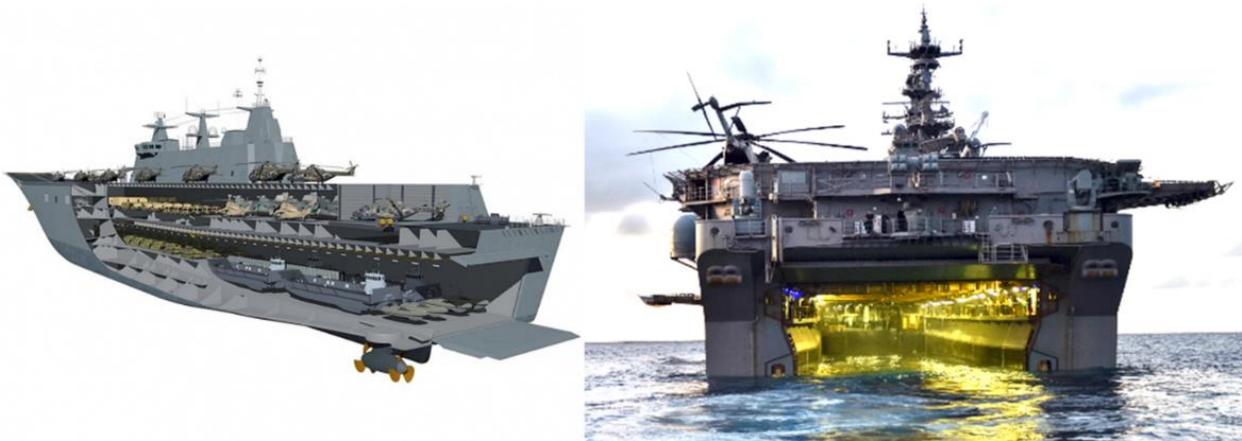
- Tipo de barco.
- Equipamiento.

2.2.1. Tipo de barco

Todavía se piensa usar un catamarán, sin embargo, no tiene por qué ser un modelo normal, ya que muy probablemente en barco tenga que construirse de cero para este propósito, sería lógico diseñar un barco con una forma más conveniente. En la Figura 12 se muestra un esquema de un buque de asalto anfibio, en otras palabras, un buque militar.

Figura 12.

Esquema y ejemplo de buque de asalto anfibio.



Nota. (Izquierda) Tomado de: NAVY [En línea]. Disponible: <https://www.navy.gov.au/fleet/ships-boats-craft/lhd> [Accedido: nov.07.23]. (Derecha) Tomado de: Amphibious assault ship [En línea]. Disponible: https://en.wikipedia.org/wiki/Amphibious_assault_ship [Accedido: nov.07.23]

Lo importante a denotar en la Figura 12 es la rampa en la popa, abertura por la cual es posible desplazar botes y tanques anfibios. Lo que se quiere hacer es aplicar esta tecnología en la proa. Se presenta el boceto de la Figura 13 para ilustrar este concepto.

Figura 13.

Boceto de catamarán con abertura anfibia en la proa.



Nota. El mecanismo se pintó púrpura para distinguirlo del petróleo negro; dibujado por Pedro Solórzano Reyes, en Microsoft OneNote [23].

2.2.2. Equipamiento

Similar al *Interceptor* [24], el barco podría estar energizado por paneles solares ubicados en el techo de este. En cuanto al desplazamiento, sin embargo, no es imposible usar energía solar, porque no sería muy eficiente o práctico, pues una de las fortalezas de esta solución es el movimiento mientras limpia por lo que sería entonces una unidad motorizada a diésel; sin embargo, este barco no está siendo construido en la actualidad, así que estas serían visualizaciones de sus mecanismos, podría llegar a funcionar a base

de **hidrógeno** en el futuro, volviéndolo una máquina capaz de revertir daño con **menores incidencias** en el ambiente.

3. MARCO TEÓRICO

3.1. Categorías de tanqueros

Estos barcos suelen dividirse en 7 categorías según su capacidad [4]:

- Transportistas de crudo ultra grandes (Ultra Large Crude Carriers, ULCC): Estos barcos miden aproximadamente 415 metros y pueden transportar de 2 millones a considerablemente por encima de 3 millones de barriles de crudo (270.000 a 410.000 toneladas métricas) [4].
- Transportistas de crudo muy grandes (Very Large Crude Carriers, VLCC): Estos barcos miden aproximadamente 330 metros y pueden transportar alrededor de 2 millones de barriles de crudo (270.000 toneladas métricas) [4].
- Suezmax: Obtiene su nombre por ser el navío más grande que puede atravesar el canal de Suez; mide aproximadamente 275 metros y puede transportar entre 800.000 y 1 millón de barriles (110.000 a 140.000 toneladas métricas) [4].
- Aframax: El buque más grande capaz de usar el “Average Freight Rate Assessment” (de ahí la sigla afra); Estos miden unos 240 metros y pueden transportar entre 500.000 y 800.000 barriles (70.000 a 110.000 toneladas métricas) [4].
- Panamax: Este barco tiene el tamaño máximo que puede atravesar el canal de Panamá, midiendo entre 200 y 250 metros; pueden cargar entre 350.000 y 500.000 barriles (50.000 a 70.000 toneladas métricas) [4].
- Handymax: Éstos tienen un tamaño práctico de unos 200 metros, lo cual es conveniente para transportes costeros; suelen cargar menos de 350.000 barriles (50.000 toneladas métricas) [4].
- Buques pequeños: Todo buque de menor tamaño que el Handymax, por ende, transportan notablemente menos de 350.000 barriles (<<50.000 toneladas métricas) [4].

3.2. Tipos de derrames

Están divididos en 5 grupos, según su comportamiento:

Grupo 1: Aceites ligeros no persistentes (Gasolina, Condensado) [25]

- Deberían evaporarse entre 1-2 días.

- No dejan residuos tras evaporación.
- Alta concentración de compuestos tóxicos solubles.
- Impactos severos y localizados en la columna de agua y los recursos intermareales.
- Limpiado puede ser peligroso debido a alta flamabilidad y peligro de aires tóxicos.

Grupo 2: Aceites ligeros persistentes (Diesel, Combustible No. 2, Crudos ligeros) [25]

- Moderadamente volátil; deja residuos (hasta un tercio de lo derramado) luego de un par de días.
- Moderadas concentraciones de compuestos tóxicos solubles.
- “Engrasará” los recursos intermareales con potencial de contaminación a largo plazo.
- Literatura sugiera que el limpiado puede ser muy efectivo.

Grupo 3: Aceites medianos (Mayoría de crudos, IFO 180) [25]

- Aproximadamente un tercio se evapora en las primeras 24 horas.
- La contaminación por petróleo de las zonas intermareales puede ser grave y duradera.
- Los impactos del petróleo en las aves acuáticas y los mamíferos con pelaje pueden ser graves.
- La limpieza es más efectiva si se realiza rápidamente.

Grupo 4: Aceites pesados (Crudo pesado, Combustible No. 6, Bunker C) [25]

- Poca o nula evaporación o disolución.
- Es probable que haya una fuerte contaminación de las zonas intermareales.
- Impactos graves para las aves acuáticas y los mamíferos con pelaje (recubrimiento e ingestión).
- Posible contaminación de sedimentos a largo plazo.
- Climatiza muy lentamente.
- La limpieza de la costa es difícil en todas las condiciones.

Grupo 5: Aceites que se hunden (Aceites de suspensión, Aceites residuales) [25]

- Se hundirá en el agua.
- Si se derrama en la costa, el petróleo se comportará de manera similar a un petróleo del Grupo 4.
- Si se derrama sobre el agua, el petróleo generalmente se hunde lo suficientemente rápido como para que no se produzca contaminación en la costa.
- Sin evaporación o disolución cuando está sumergido.
- Impactos severos para los animales que viven en los sedimentos del fondo, como los mejillones.
- Posible contaminación de sedimentos a largo plazo.
- Se puede extraer del fondo de un cuerpo de agua mediante dragado.

3.3. Categorías de derrames

Generalmente se categorizan en 3 rangos, según su magnitud.

- Categoría 1 - Derrame pequeño: <7 toneladas métricas (<50 bbls).
- Categoría 2 - Derrame mediano: 7-700 toneladas métricas (50-5000 bbls).
- Categoría 3 - Derrame grande: >700 toneladas métricas (>5000 bbls), esta última puede ser extremadamente amplia. [26]

3.4. Tratamiento de aguas residuales

Las aguas residuales se dividen en dos orígenes, domésticas y no domésticas. Las domésticas son aquellas procedentes de los hogares o instalaciones donde se desarrollen actividades industriales, comerciales o de servicios y corresponden a:

- Descargas de retretes y servicios sanitarios.
- Descargas de sistemas de aseo personal, de cocinas, de elementos de aseo, lavado de paredes y pisos y del lavado de ropa (sin incluir servicios de lavandería industrial).

Las no domésticas son las que proceden de las actividades industriales, comerciales o de servicios y son distintas a las que constituyen aguas residuales domésticas [27]. Sin importar la procedencia, las plantas de tratamiento de estas aguas cumplen las siguientes funciones:

- Eliminar sólidos.
- Reducir la materia orgánica y los contaminantes.
- Restaurar el oxígeno. [28]

La planta por diseñar sería equivalente a una planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR) no domésticas, puesto que la contaminación inicial del agua es debida a un accidente de orden industrial. La primera sección relevante es la eliminación de sólidos, pues la superficie marina puede llevar restos metálicos de tuberías rotas que causaran el derrame, residuos plásticos por la contaminación global, o incluso animales muertos por el período de tiempo expuestos a los componentes tóxicos; y la segunda sección relevante es reducir la materia orgánica y los contaminantes, por motivos evidentes. La restauración del oxígeno no será manejada puesto que la fracción de agua que se tratará en cada situación no es representativa en comparación con el volumen del océano.

Para efectuar estos objetivos, las PTAR llevan a cabo una serie de procesos:

- **Coagulación:** Proceso efectuado por agente coagulante cuya función es desestabilizar las cargas de las partículas de la sustancia en suspensión, mediante cargas opuestas, lo cual permite que las partículas se pueden unir y formar partículas de mayor tamaño llamadas floc; este proceso requiere de mezclado para que las partículas puedan juntarse. [29]
- **Floculación:** Proceso que le sigue a la coagulación donde las partículas se continúan mezclando (mezclado lento), y presenta la posibilidad de añadir un segundo agente químico, el agente floculante, cuya función es parcialmente igual a la del agente coagulante, pero tiene la función extra de añadirle peso a las macropartículas, lo cual facilita la sedimentación o filtración que se haga después. [29]
- **Sedimentación:** Es una operación de separación sólido-fluido en la que las partículas sólidas en suspensión (floc) se separan por acción de la gravedad, obteniendo una salida superior de agua con notablemente menor NTU, y un efluente en fondos conocido como lodo, que requiere otro tratamiento para su disposición. [30]
- **Filtración:** El sistema de filtración se encarga de hacer pasar el agua a través de un medio poroso, con el objetivo de conservar la mayor cantidad posible de materia en suspensión.[31]

- Tratamiento de lodos: Se entiende por lodos como el material removido del agua durante todo el tratamiento, suele ser en mayor parte sólido [32], sin embargo, para este trabajo será en mayor parte petróleo, pero tendrá los químicos usados y algunos otros sólidos no previamente filtrados, por lo que se considera merma.

Estos procesos son los básicos, pues es posible que algunas aguas requieran otros tratamientos; el proyecto evaluará la implementación de algunos de estos procesos para el diseño de la planta, y para garantizar el tratamiento óptimo del agua.

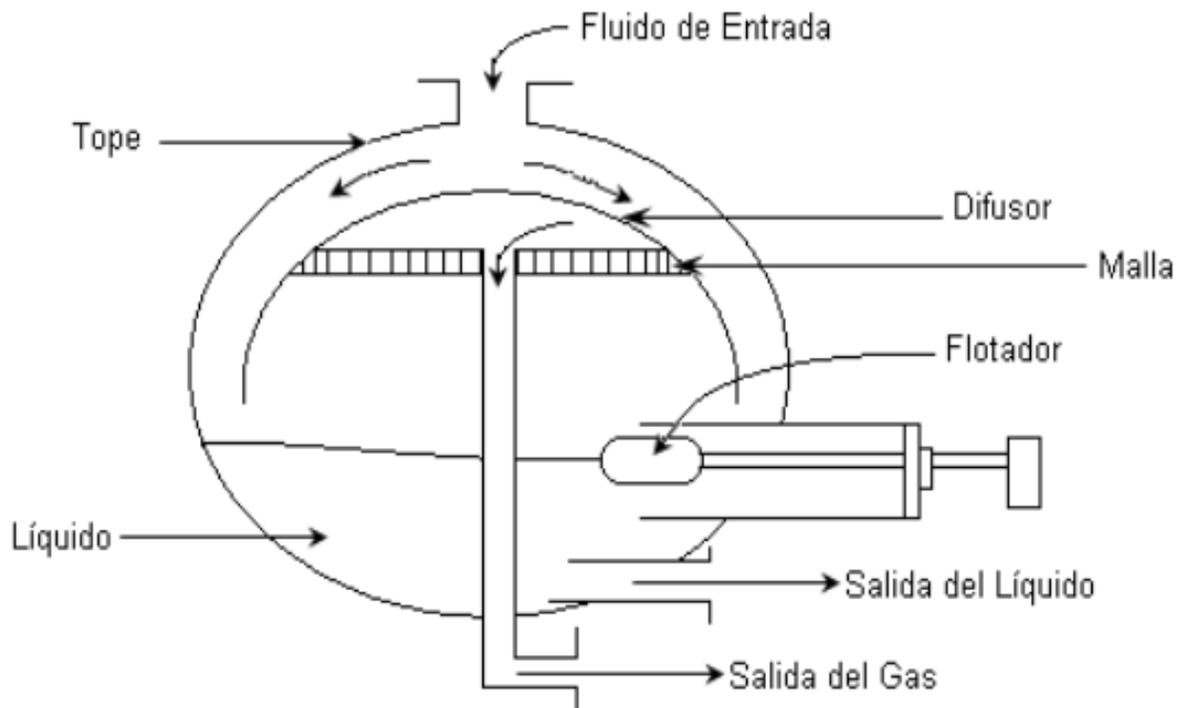
3.5. Procesos de separación

Se establecen los tipos de separación y separadores para diferenciar y comparar con el equipo a desarrollar.

- Separador bifásico: “Son recipientes diseñados con el objetivo de separar el gas y líquido inmiscible, dejando lo más libre posible el gas del petróleo y viceversa, a condiciones de presión y temperatura definidas”. [33]
- Separador trifásico: “Se utilizan generalmente para la separación de tres fases: aceite, agua y gas.” Su estructura es esencialmente igual a los separadores bifásicos con unas pocas diferencias que les permite distribuir mejor las fases. [33]
- Separador esférico: “No son comúnmente usados, fueron diseñados con el propósito de aprovechar su tamaño compacto, sin embargo, son equipos de difícil operación, la separación no es óptima, y su manufactura es complicada[33]. Puede apreciarse en la Figura 14.

Figura 14.

Esquema de separador esférico.

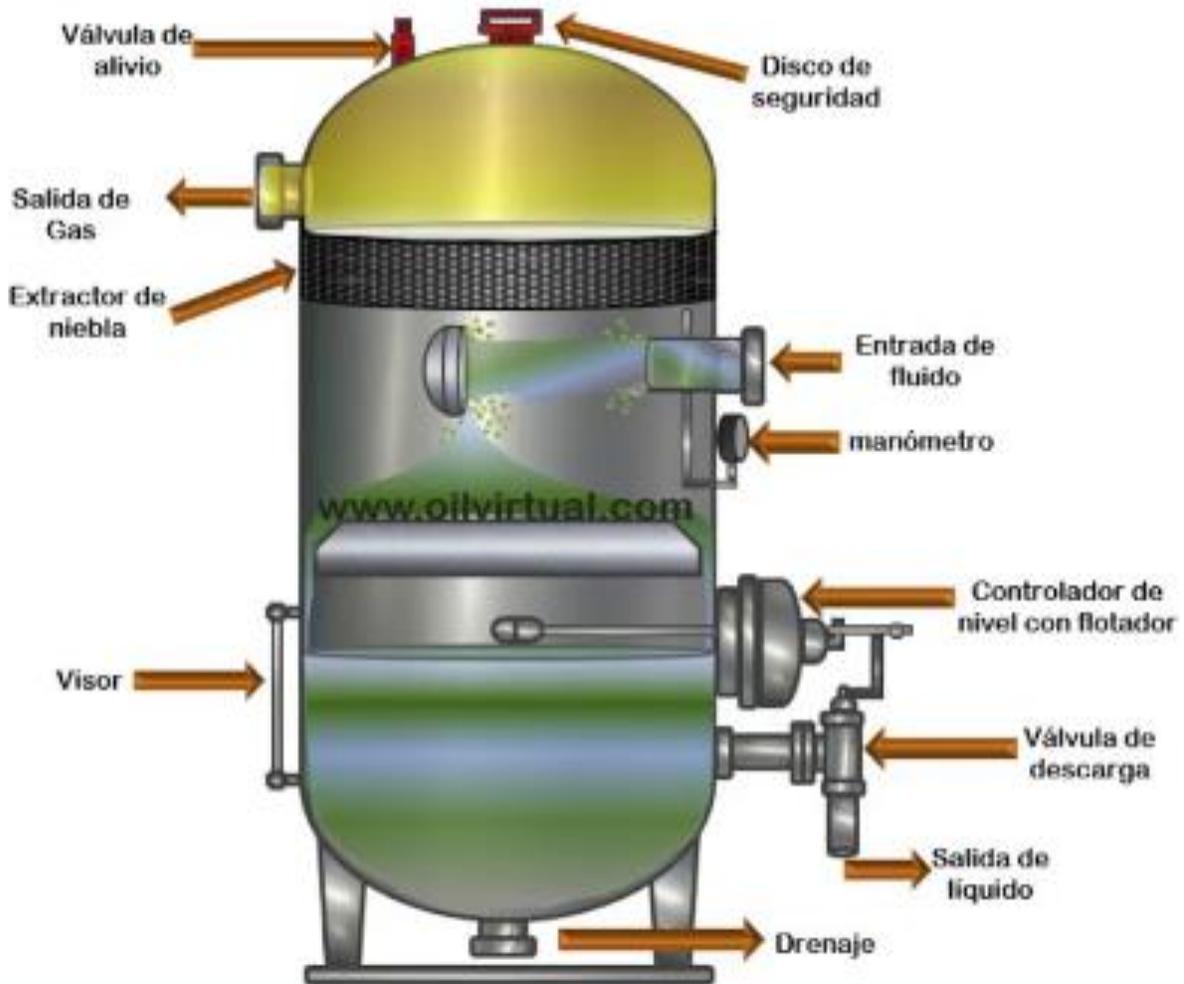


Nota. Tomado de: “SEPARADORES ESFÉRICOS - El gas natural es una mezcla de hidrocarburos que se encuentran en los yacimientos, bien...” [En línea]. Disponible: <https://med.se-todo.com/himiya/3909/index.html?page=4> [accedido: oct.04.2022].

- Separador vertical: Recipiente comúnmente utilizado en corrientes con relación gas-líquido alta, como gases prácticamente secos o con una mínima cantidad de líquidos en forma de niebla. Se puede emplear en presencia de sólidos en la corriente [33]. Puede apreciarse en la Figura 15.

Figura 15.

Esquema de separador bifásico vertical.

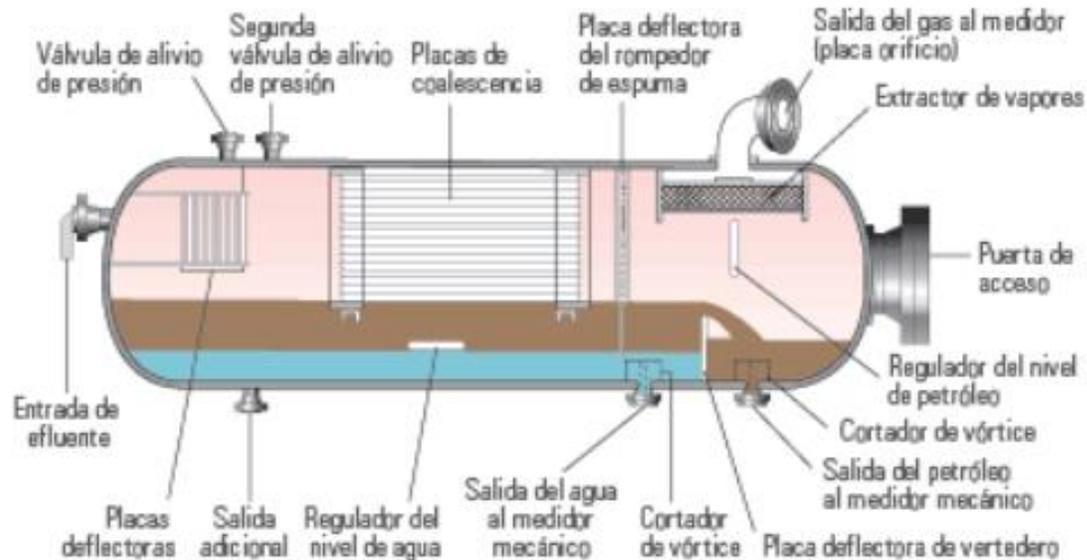


Nota. Tomado de: “Separador Bifásico Vertical - YouTube.” [En línea]. Disponible: <https://www.youtube.com/watch?v=yXwEXE1lr4o> [accedido: oct.04.2022].

- Separador horizontal: Recipiente utilizado para separar petróleo, gas y agua; puede ser de dos o tres fases [33]. Puede apreciarse en la Figura 16.

Figura 16.

Esquema de separador trifásico horizontal.



Nota. Estos equipos son la preferencia de la industria petrolera. Tomado de: separador horizontal | Energy Glossary.” [En línea]. Disponible: https://glossary.slb.com/es/terms/h/horizontal_separator [accedido: oct.04.2022].

- Decantación: Es un método físico de separación de mezclas homogéneas, puede ser líquido-líquido o líquido-sólido. Se basa en la diferencia de densidades de las sustancias a separar, y en la acción de la gravedad, entonces, los componentes más pesados luego de cierto tiempo yacen en el fondo del decantador, y los más ligeros yacen en la sección superior. [34]
- Extractor de niebla: Dispositivo para recolectar pequeñas gotas de líquido (humedad o hidrocarburos) del flujo de gas antes de que éste salga del separador. Tipos: almohadillas de malla de alambre; aletas. [35]
- Placas de presión: Es una placa movable conectada a un sistema que mide la presión sobre ésta, cuando alcanza cierto peso, la placa se mueve, lo cual puede accionar algún mecanismo.

- Superficie hidrofílica: Son superficies con afinidad por el agua y son adhesivas [36]. Esto significa que, si se les pasa una corriente con varias sustancias, las partículas de agua serán adheridas.
- Superficie hidrofóbica: Inverso a las hidrofílicas, las hidrofóbicas repelen el agua [37]. Haciendo uso del ejemplo anterior, si se le pasara una corriente con varias sustancias, es definitivo que el agua no quedará adherida, pero no implica que las otras sustancias se adhieran.
- Superficie oleofílica: Similar a la superficie hidrofóbica, pues es capaz de repeler el agua, pero también es capaz de adherir compuestos hidrocarburos. [38]

Estos elementos serán evaluados para el diseño del UCS.

3.6. Ecuaciones de CFD

De forma muy resumida, la Figura 17 muestra las ecuaciones que usa el *so/ver* de Ansys Fluent para resolver los balances de masa, momento y energía, éstas se resuelvan en cada celda de la malla.

Figura 17.

Ecuaciones Navier-Stokes para continuidad, momento en cada componente, y energía.



Navier–Stokes Equations

3 – dimensional – unsteady

**Glenn
Research
Center**

Coordinates: (x,y,z)	Time : t Pressure: p	Heat Flux: q
Velocity Components: (u,v,w)	Density: ρ Stress: τ	Reynolds Number: Re
	Total Energy: Et	Prandtl Number: Pr

Continuity:
$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0$$

X – Momentum:
$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u^2)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho uv)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho uw)}{\partial z} = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{1}{Re_r} \left[\frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} \right]$$

Y – Momentum:
$$\frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho uv)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v^2)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho vw)}{\partial z} = -\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{1}{Re_r} \left[\frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial z} \right]$$

Z – Momentum:
$$\frac{\partial(\rho w)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho uw)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho vw)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w^2)}{\partial z} = -\frac{\partial p}{\partial z} + \frac{1}{Re_r} \left[\frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z} \right]$$

Energy:

$$\frac{\partial(E_T)}{\partial t} + \frac{\partial(uE_T)}{\partial x} + \frac{\partial(vE_T)}{\partial y} + \frac{\partial(wE_T)}{\partial z} = -\frac{\partial(Up)}{\partial x} - \frac{\partial(vp)}{\partial y} - \frac{\partial(wp)}{\partial z} - \frac{1}{Re_r Pr_r} \left[\frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} + \frac{\partial q_z}{\partial z} \right]$$

$$+ \frac{1}{Re_r} \left[\frac{\partial}{\partial x} (u \tau_{xx} + v \tau_{xy} + w \tau_{xz}) + \frac{\partial}{\partial y} (u \tau_{xy} + v \tau_{yy} + w \tau_{yz}) + \frac{\partial}{\partial z} (u \tau_{xz} + v \tau_{yz} + w \tau_{zz}) \right]$$

Nota. Tomado de: Glenn Research Center [En línea]. Disponible: <https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/airplane/nseqs.html> [accedido: oct.14.2023].

4. MARCO CONCEPTUAL

4.1. Sustancias

El proceso tiene dos componentes a tratar:

- Agua: El agua de mar/océano. No se desea modificar sus cualidades, únicamente volverla lo más cercano posible a lo que era antes de la contaminación. En el documento, se referirá ocasionalmente como *water*.
- Hidrocarburos: Son un grupo de compuestos orgánicos que contienen principalmente carbono e hidrógeno. Pueden encontrarse en forma líquida natural (petróleo), líquida por condensación (condensados y líquidos del gas natural), gaseoso (gas natural) y sólido (en forma de hielo como son los hidratos de metano) [39]. En el documento, se referirá ocasionalmente como *oil*.

4.2. Software

La utilización de software corresponde a la sección más intensa conceptualmente del trabajo, pues requiere no sólo manejo de las herramientas, sino también mucha fundamentación teórica y matemática del tema a tratar. A continuación, conceptos y herramientas a evaluar su uso:

- CFD: *Computational Fluid Dynamics*, es el proceso de modelar matemáticamente un fenómeno físico que involucra un flujo de fluido y resolverlo numéricamente haciendo uso de la destreza computacional. [40]
- Mallado: Es un proceso por el cual la geometría dibujada se cubre con ciertas geometrías de menor tamaño. El propósito es crear una cuadrícula de puntos que se utilizan para resolver el sistema de ecuaciones diferenciales parciales que gobiernan el comportamiento de los fluidos en una simulación CFD. [41]
- Solid Edge: Es un software con herramientas de desarrollo de productos para diseño mecánico y eléctrico, simulación, fabricación, publicaciones técnicas, gestión de datos, entre otras. [42]

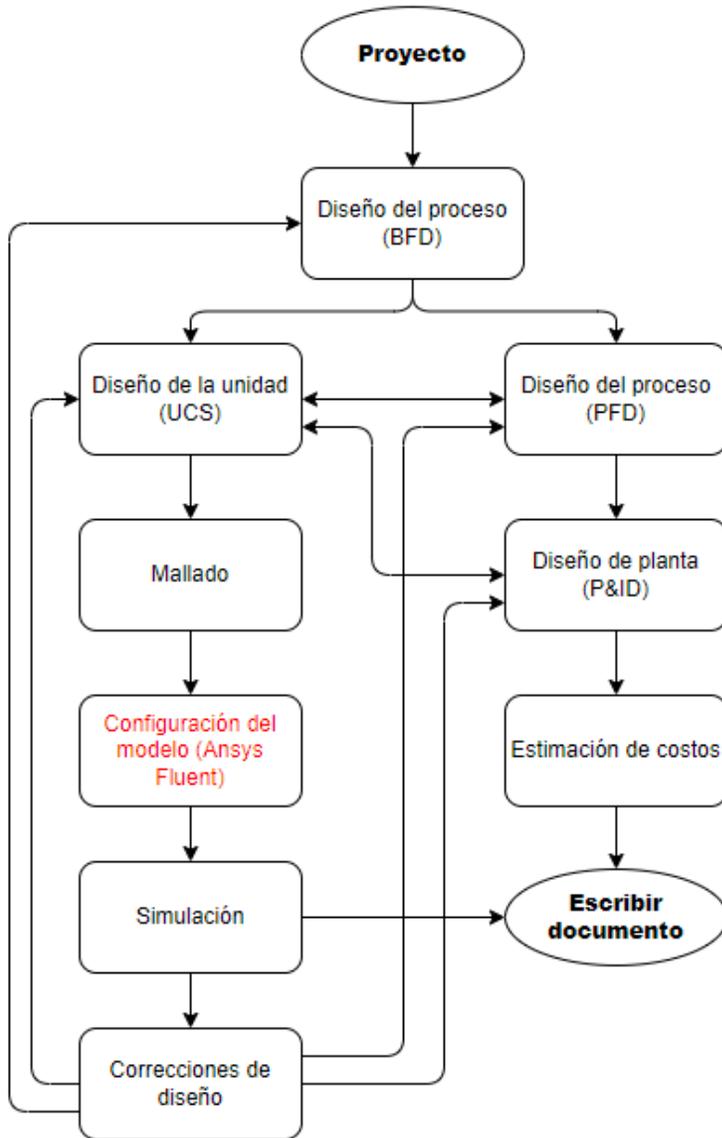
- ANSYS Student: Es un software de simulación aplicado al diseño de productos, cuenta con modelamiento geométrico integrado, y con *solvers* térmicos, estructurales y de fluidos. [43]
- MATLAB: Software pago con versión estudiantil con requerimiento de conocimiento intermedio de programación en lenguaje derivado de C, también facilidades similares a Ansys Fluent. [44]
- OpenFOAM: Software libre con requerimiento intermedio-avanzado de programación en C++ y manejo de máquinas virtuales, así como manejo de consola. [45]
- FluidX3D: Software libre para uso no comercial con gran potencial y requerimiento de conocimiento principiante-intermedio de programación en C++. [46]

5. METODOLOGÍA

Se identificó como primer paso el desarrollo del **diagrama de proceso (BFD)**. A partir del BFD se liberan: **Diseño de la unidad (UCS)** y **Diseño del proceso (PFD)**; sin embargo, se puede apreciar que estas secciones están conectadas por una flecha doble, el motivo de esto se hizo evidente rápidamente, pues no era posible completar el un diseño sin la información del otro (en este caso no era posible definir correctamente las dimensiones de la UCS sin saber la capacidad que el proceso manejaría, inversamente, no era posible realizar el balance de masa sin saber las dimensiones de las tuberías de la UCS). El mismo problema sucedía entre **Diseño de la unidad (UCS)** y **Diseño de planta (P&ID)**, pero más importantemente, un paso esencial eran las correcciones de diseño después de la simulación que, originalmente se pensaba que únicamente afectarían la UCS, realmente afectan todos los diseños. En la Figura 18 se describe la secuencia metodológica del proyecto.

Figura 18.

Diagrama de bloque de la metodología.



Nota. La sección “Configuración del modelo (Ansys Fluent)” es la única completamente independiente de todas las relaciones.

Las etapas de **Diseño de la unidad (UCS)** y **Diseño de planta (P&ID)** se realizaron en forma paralela para garantizar la interacción de soluciones y el engranaje de elementos a medida que los procesos evolutivos de cada uno de los pasos avanzaban.

5.1. Diseño de la unidad (UCS)

Originalmente se planteó presentar un modelo 3D de este equipo desarrollado en Solid Edge, con el propósito de transferir este archivo y finalmente hacer una simulación 3D en Ansys Fluent; sin embargo, una gran complicación de este enfoque es el gran coste computacional a la hora de realizar simulaciones. Por ello, y luego de probar las demandas de hardware para hacer funcionar la simulación 3D, se optó por realizar una simulación 2D, por lo que se consideró innecesario usar Solid Edge, y se decidió usar la herramienta de dibujo Ansys SpaceClaim [47], que se puede encontrar en el aplicativo Ansys Workbench [48].

La metodología de diseño empleada fue el método científico, con la realización de frecuentes ensayos de prueba y error. Se probaron múltiples diseños, evaluando en cada ocasión numerosos parámetros físicos (tales como velocidad, turbulencia-k, disipación de turbulencia- ϵ , etc.). La visualización de lo que funcionaba y lo que no, fue posible a través de líneas de trayectoria (conocidas como *pathlines*) y contornos (*contours*) de densidad. Basándonos en los resultados obtenidos, y considerando el tiempo necesario para simular escenarios, una vez definido un diseño lo suficientemente aceptable en términos de los parámetros mencionados, se avanzó a la siguiente etapa.

5.2. Software de simulación CFD

La simulación se realizará usando la versión estudiantil gratuita del software Ansys Fluent [49]. El motivo de usar esta herramienta es principalmente su simplicidad, el proceso de simulación puede ser llamado caja negra, pues en la definición del modelo sólo se especifican las condiciones (mediante botones de radio y/o casillas de verificación), mas no se hace gran hincapié a los aspectos matemáticos del modelo. [50]

5.3. Diagramas BFD, PFD y P&ID

Todos los diagramas de este trabajo fueron desarrollados usando la herramienta Visual Paradigm Online [51]. El motivo es su simplicidad, acceso a numerosos dibujos técnicos, disponibilidad de agregar tantas figuras como se requiera, y que es de libre uso, no comercial.

5.4. Costos

El enfoque de esta sección fue el de generar una estimación de cuánto sería el costo de la fabricación del **barco**. Dentro de esta estimación se listaron costos individuales de equipos principales y auxiliares con el fin de estimar cuánto es el costo material de la planta. Al resultado de esto se le sumó el costo de un barco con las dimensiones deseadas aproximadas, y este valor final se multiplicará por un porcentaje que debería permitir estimar cuánto costaría construir el barco de cero. Finalmente se hizo un análisis de bondad financiera para comprobar la factibilidad del proyecto.

6. DISEÑO DE PROCESO

6.1. Diagrama BFD

Para realizar el BFD, se aplicó una combinación de 3 sistemas: Separación de sólidos y recolección de fluido; separación y recirculación; coagulación, floculación y filtración.

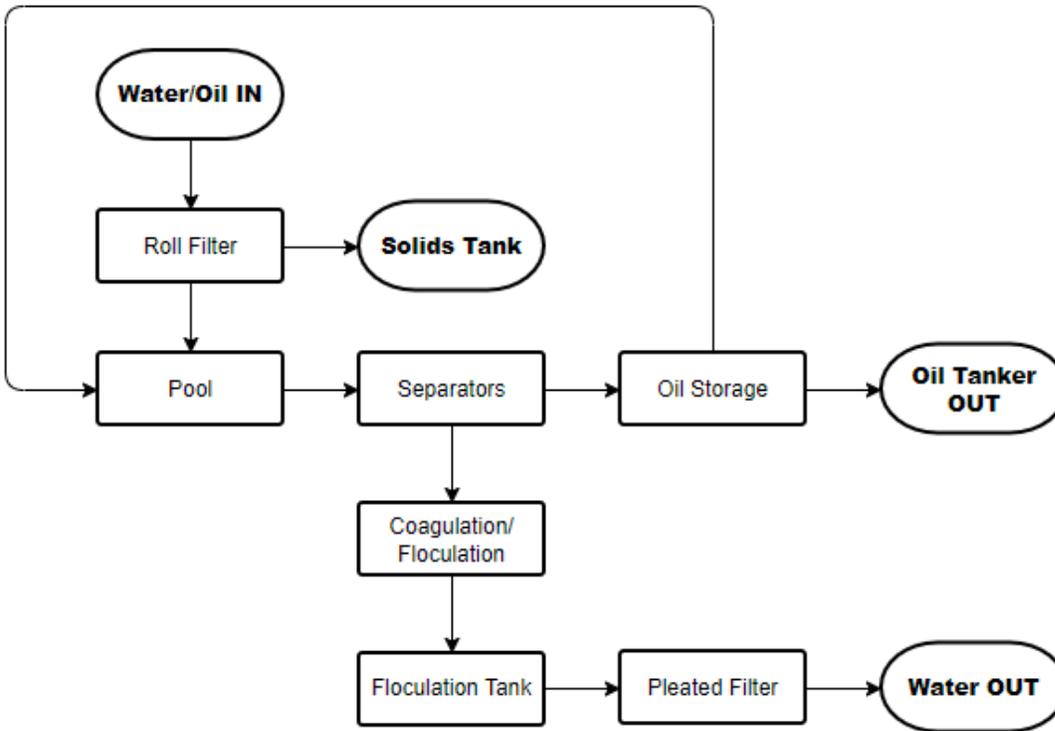
Al inicio (ver Figura 19) ingresa una combinación agua/aceite y pasa por un filtro denominado “Roll Filter”, el concepto de este filtro es similar al método que usa el Interceptor de The Ocean Cleanup [24], con la diferencia de que el enfoque principal es tratamiento de fluido, por lo que el filtro tendrá inevitablemente espacios para que el fluido pase; ver la Figura 20 en donde se ilustra la idea.

La cinta transportadora con poros pasa por adentro y luego alrededor del *Pool*, con una “parada” para depositar los residuos; este tanque de residuos eventualmente se extrae cuando se haga el vaciado con el barco auxiliar.

El Pool sería un tanque considerablemente grande en la entrada del proceso cuya función es dar lugar al fluido mezcla entrante para eventualmente poder bombearlo a los separadores agua/petróleo.

Figura 19.

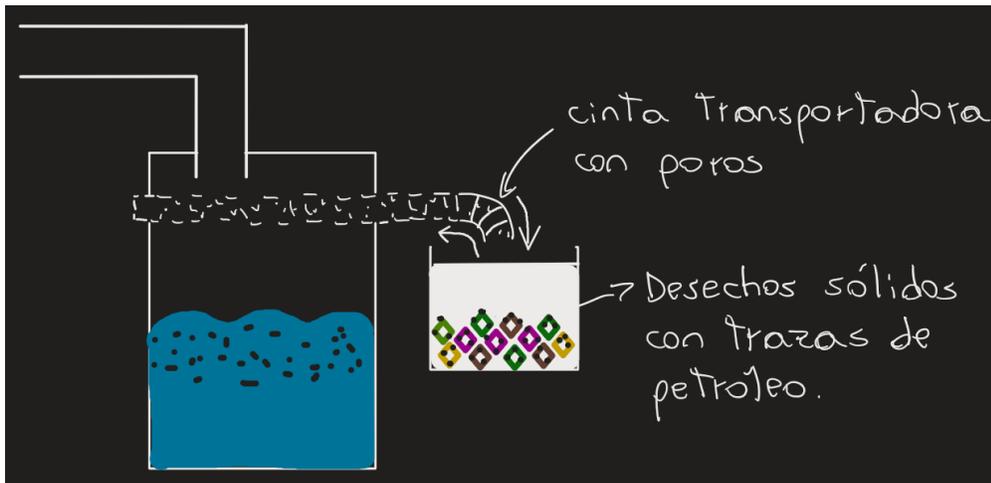
Diagrama de flujo de bloques.



Nota. Realizado por Pedro Solórzano Rivero, utilizando Visual Paradigm Online [51].

Figura 20.

Ilustración conceptual del "Roll Filter".



Nota. Realizado por Pedro Solórzano Rivero, en Microsoft OneNote [23].

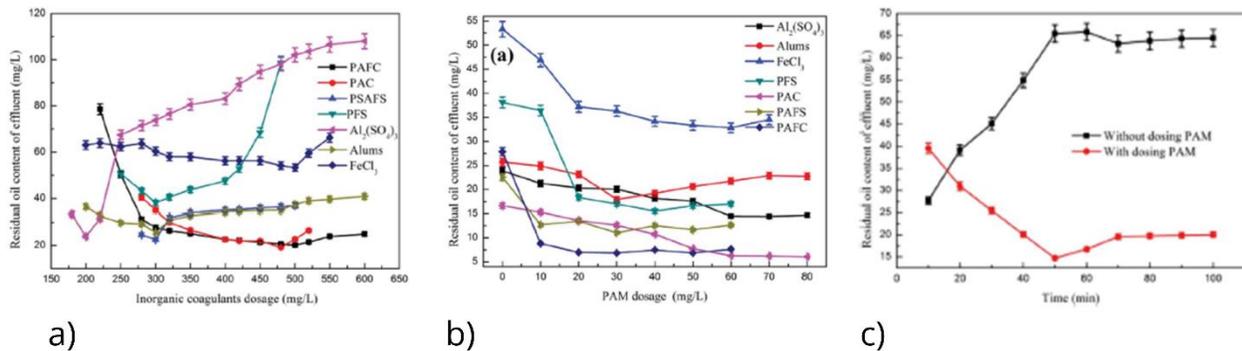
La salida del Pool va directo a los separadores, cuyo funcionamiento explícito se explicará más adelante. Cada separador tiene dos salidas: Oil OUT y Water OUT, en donde la primera tiene mayoritariamente aceite, e inversamente, la segunda tiene mayoritariamente agua. La primera salida se dirige a un tanque de almacenamiento, que a la larga puede visualizarse como un decantador final; el planteamiento es que este tanque tenga sensores que permitan que el operario de la cabina de control pueda prender una bomba, situada en la sección inferior del tanque, que recircule posible agua asentada al Pool. Eventualmente cuando el tanque de almacenamiento supere cierto porcentaje de llenado, de probablemente no más de 80% según literatura y heurística [52], el proceso se frena para vaciar el tanque (y vaciar el de residuos sólidos de ser necesario). La segunda salida se dirige al sistema de Coagulación/Floculación.

La razón de la existencia del tercer sistema es lograr la máxima limpieza posible antes de recircular el agua al mar/océano, sin embargo, la propuesta es un sistema experimental. No es experimental en cuanto a su funcionamiento, pues no es raro usar floculación, coagulación y filtración en plantas de tratamiento de agua, el problema es que normalmente estos procesos toman bastante tiempo (al menos 20 minutos, pero puede durar horas) ya que no es inmediata la unión de las partículas [53], y en el planteamiento se intenta acelerar este proceso tanto como sea posible, con la intención de no causar embotellamiento. Para lograr esto se proponen 2 cosas: Una combinación efectiva de coagulante / floculante diseñado para efluentes petrolíferos [54], y un sistema de mezclado continuo a lo largo de tuberías para agilizar el proceso [55].

El artículo “Effective treatment of emulsified oil wastewater by the coagulation–flotation process” usa una combinación de coagulante y floculante que sugiere una aceleración del proceso [54]. A continuación, en la Figura 21, se presentan los resultados relevantes.

Figura 21.

Gráfica de contenido de aceite en el efluente vs dosis de coagulante inorgánico.



Nota. (a) muestra la efectividad de los coagulantes, (b) efectividad de los floculantes, (c) afectación del tiempo ante presencia o ausencia del floculante. Tomado de: Effective treatment of emulsified oil wastewater by the coagulation–flotation process [En línea]. Disponible: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC9091706/> [accedido: mar.10.2023]. Ver Anexo1.

Los investigadores primero probaron varios coagulantes y reportaron sus resultados; en primera instancia, los coagulantes PAC y PAFC parecen ser los más efectivos. Luego volvieron a probar los mismos, pero con adición del floculante PAM, inmediatamente la mejor combinación pareció ser con PAC. Por último, usando PAM mejora el tiempo en prácticamente todos los puntos; esto se combina con el mezclador tubular Statiflo [55], que se puede visualizar en la Figura 22, para conseguir teóricamente conseguir máxima velocidad sin sacrificar eficiencia.

Luego de que el flujo se haya mezclado con los aditivos, llega a un tanque de floculación cuyo verdadero propósito es extender un poco más el tiempo antes de la filtración. Finalmente, se filtra el floc antes de poder liberar el agua al mar/océano. El método es mediante filtros plisados; esto no es una elección absoluta, pero según la investigación pareciera ser conveniente, pues se planea poder activamente cambiar los filtros en ciertos momentos que se detallarán más adelante. La compañía expresa que es fácil y rápido hacer cambio de filtro, en la Figura 23 se ejemplifica el tipo de filtro y su funcionamiento.

Figura 22.

Mezclador tubular Statiflo.



Nota. Tomado de: Pipe Static Mixers [En línea]. Disponible: <https://statiflo.com/products-2/pipe-static-mixers/> [accedido: mar.10.2023].

Figura 23.

Filtro de agua plisado.



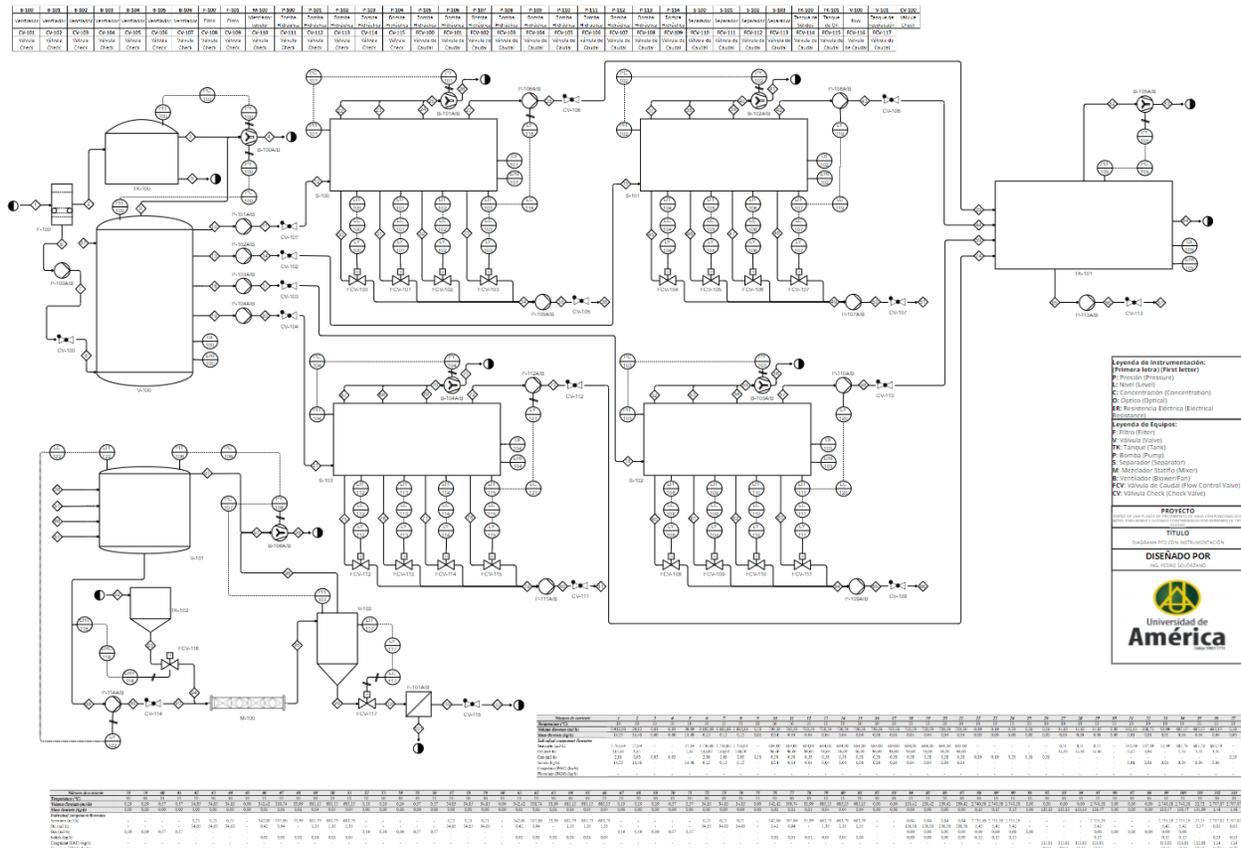
Nota. En la derecha se ve el filtro (ignorar medida), en la izquierda se describe el funcionamiento. Tomado de: Membrane Solutions 20 Micron Pleated Water Filter [En línea]. Disponible: https://www.amazon.com/Membrane-Solutions-Replacement-Compatible-CB1-SED10BB/dp/B082WRG6YR/ref=sr_1_1_sspa?keywords=pleated+water+filter&qid=1699237746&sr=8-1-spons&sp_csd=d2lkZ2V0TmFtZT1zcF9hdGY&psc=1 [accedido: mar.10.2023].

Adicionalmente, aunque no se muestre en el diagrama, todos los equipos tienen un sistema de ventilación por lo que todos tendrían una flecha de salida superior al exterior.

6.2. Diagrama PFD

Figura 24.

Diagrama de Flujo de Proceso (PFD).

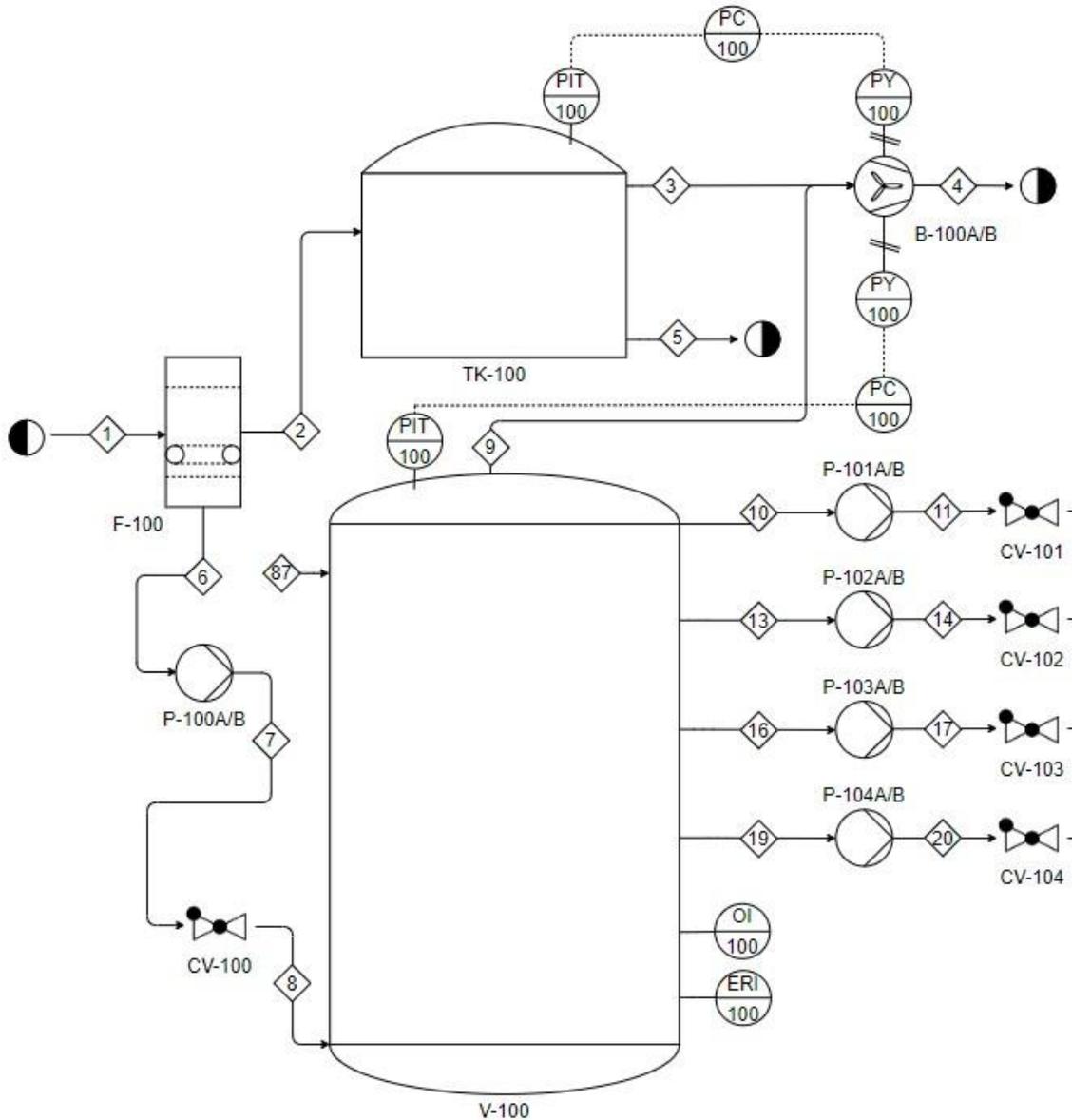


Nota. Quinta versión del diagrama; Sistema usado: ISO 10628; la tabla de equipos, el balance de masa y la evolución del diagrama pueden indagarse en el anexo 4 - 13; dibujado por Pedro Solórzano Rivero.

Dado que es muy difícil distinguir qué sucede en el diagrama, se dividirá en cuatro partes para explicar por separado qué es cada elemento, y su justificación de ser necesario.

Figura 25.

Diagrama de flujo de proceso – Primera parte.

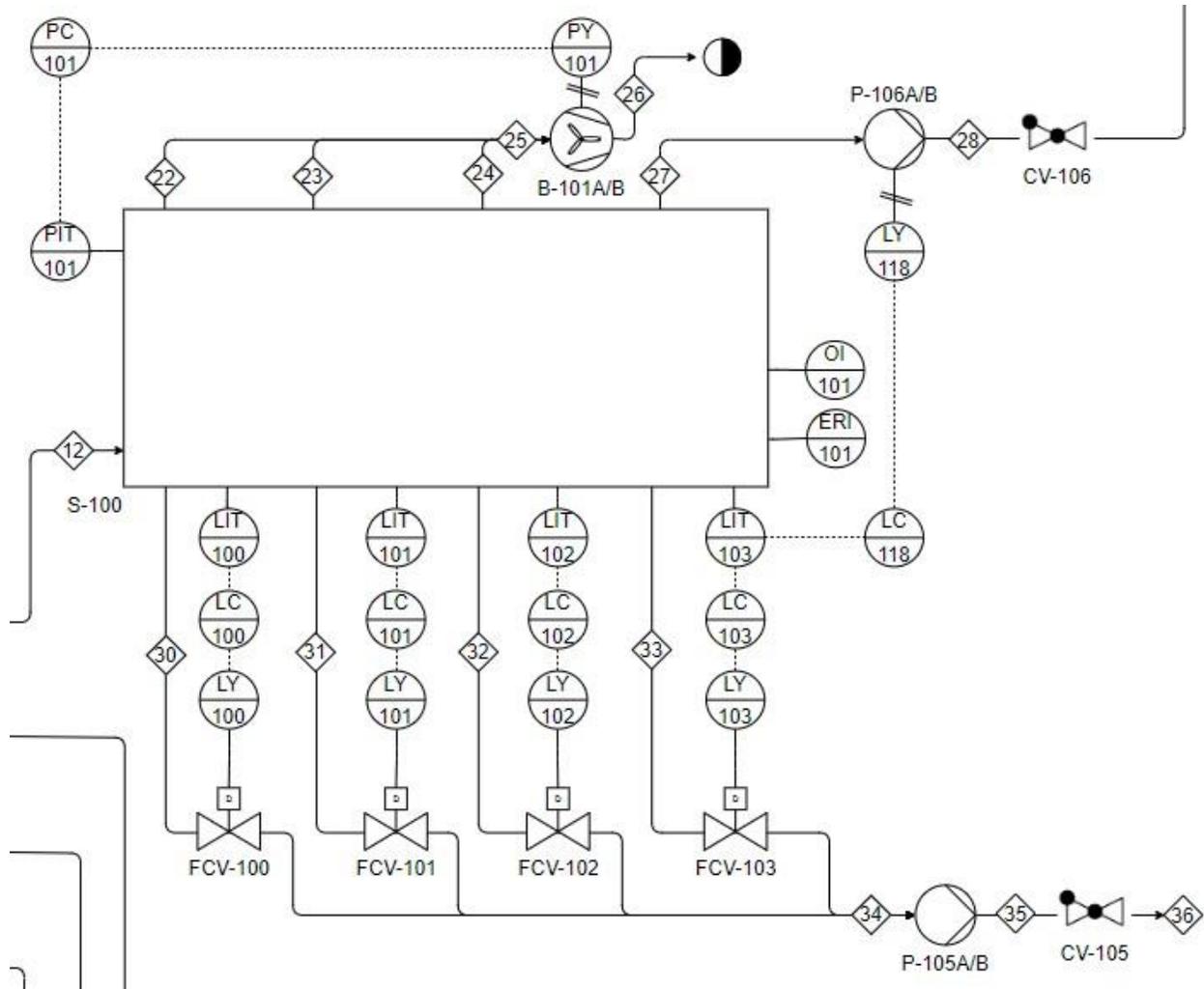


Nota. V: Vessel (Tanque); F: Filter (Filtro); P: Pump (Bomba); TK: Tank (Tanque de almacenamiento); B: Blower/Fan (Ventilador); CV: Check Valve (Válvula Check); A/B indica que hay un equipo activo y uno en espera; Sistema usado: ISO 10628; dibujado por Pedro Solórzano Rivero.

En la entrada, los sólidos del fluido son extraídos por el filtro F-100 y llevados al tanque de almacenamiento TK-100; el fluido continúa su camino hacia el Pool V-100, donde se dividirá en 1 a 4 direcciones para ir a los separadores según la cantidad de separación requerida. Todas las bombas del sistema tienen su correspondiente válvula check para evitar situación en la que se devuelva el fluido, como sugiere la literatura y heurística [56]. En la salida superior de cada equipo hay un sistema automático de ventilación; el motivo es que no haya acumulación de gas y/o burbujas de aire que aumenten la presión de los equipos. Todos los instrumentos reportan su información a una cabina de control que se encuentra en la sección superior del barco. La corriente (87) es una recirculación que se identificará en la Figura 27.

Figura 26.

Diagrama de flujo de proceso – Segunda parte.



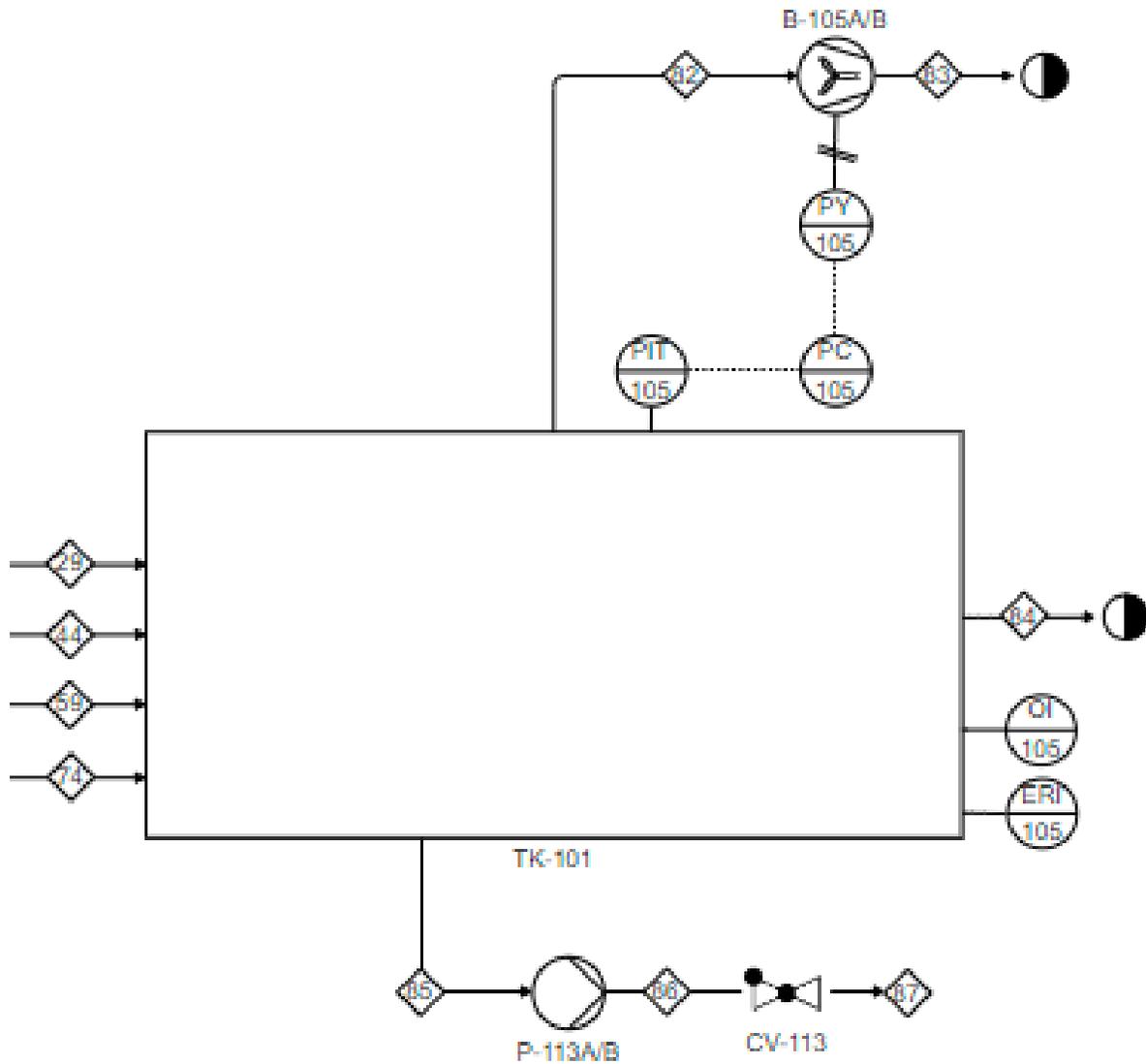
Nota. S: Separator (Separador); P: Pump (Bomba); B: Blower/Fan (Ventilador); CV: Check Valve (Válvula Check); FCV: Flow Control Valve (Válvula de control de caudal); A/B indica que hay un equipo activo y uno en espera; Sistema usado: ISO 10628; dibujado por Pedro Solórzano Rivero.

Este es el núcleo del proceso, pues dependiendo de la eficiencia de este equipo, se define la capacidad productiva del barco entero, como mínimo es el que mayor chance tiene de volverse cuello de botella; más adelante se especificará el funcionamiento interno. En términos sencillos, todos los equipos e instrumentación rodeando cada separador garantiza su funcionamiento automático. La salida superior (28) se conocerá

más adelante como *outlet_oil*, las salidas en el techo son de gas, y las salidas en la parte inferior son todas de agua.

Figura 27.

Diagrama de flujo de proceso – Tercera parte.

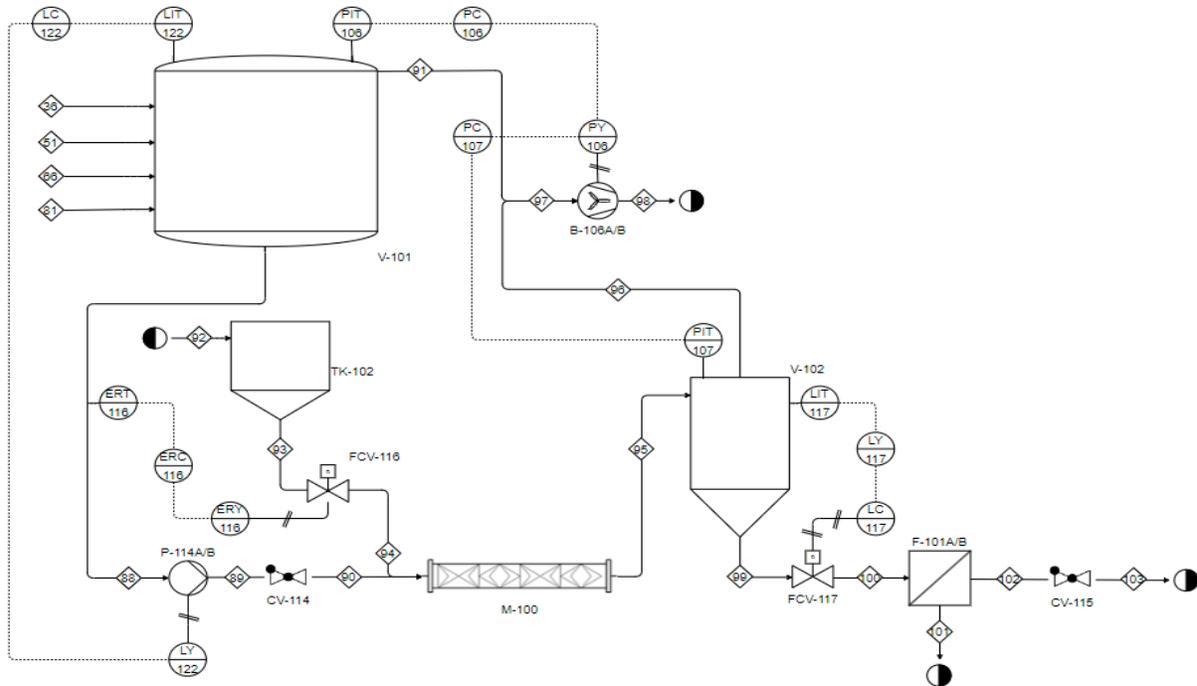


Nota. TK: Tank (Tanque de almacenamiento); B: Blower/Fan (Ventilador); P: Pump (Bomba); A/B indica que hay un equipo activo y uno en espera; Sistema usado: ISO 10628; dibujado por Pedro Solórzano Rivero.

El TK-101 es el tanque de almacenamiento de aceite; tiene su respectivo sistema de ventilación, y por debajo tiene el sistema de recirculación, que como mencionado anteriormente es activado por el operario mediante el uso de sensores.

Figura 28.

Diagrama de flujo de proceso – Cuarta parte.



Nota. V: Vessel (Tanque); F: Filter (Filtro); P: Pump (Bomba); TK: Tank (Tanque de almacenamiento); B: Blower/Fan (Ventilador); CV: Check Valve (Válvula Check); FCV: Flow Control Valve (Válvula de control de caudal); M: Mixer (Mezclador); A/B indica que hay un equipo activo y uno en espera; Sistema usado: ISO 10628; Dibujado por Pedro Solórzano Rivero.

El V-101 es un tanque de recolección de agua de las salidas de los separadores, su propósito es juntar las tuberías para iniciar la coagulación/floculación, y en caso de tener que frenar el proceso, permite el vaciado de los separadores para limpiar la última porción. La salida de este tanque es una única tubería pero se quiere aclarar que esto no es obligatorio; el TK-102 es el tanque de alimentación por gravedad en forma de embudo del coagulante/floculante que, mediante un sensor de resistividad eléctrica y pruebas experimentales, con la válvula FCV-116 es teóricamente posible regular

automáticamente la cantidad del material que se debe estar suministrando a la corriente cada segundo; el mezclado se hace en toda la duración de la tubería, que se planea acomodar en serpentín para aprovechar al máximo la cantidad de espacio disponible antes de llegar al tanque de floculación (V-102).

Una vez llegado al V-102 las partículas flotantes tienen un poco más de tiempo para juntarse, y por ser de principalmente aceite, no se asientan, sino que flotan, por lo que la salida a los filtros plisados es por debajo del tanque. Como se puede ver el filtro tiene nombre F-101A/B, esto es porque al final del proceso se tiene una bifurcación de tuberías, donde nada más hay un filtro activo a la vez, para efectos de servicio. La salida final se dirige al mar/océano por la parte de atrás del barco.

7. DISEÑO DE EQUIPO

En este capítulo se plantea el diseño de la unidad central de separación del proceso, anteriormente mencionada como S-100 en el PFD en el que no se explicó cómo era su funcionamiento.

7.1. Condiciones de diseño

La simulación en términos del simulador es 2D, pero en otra perspectiva podría considerarse 2.5D, pues el protocolo de Ansys Fluent para el tratamiento de simulaciones 2D añade una profundidad de 1 metro que el usuario no puede visualizar [57], [58].

La sustancia identificada como aceite, es diésel, el motivo de esto es proximidad con el tipo de aceite que se trataría en casos reales, y conveniencia a la hora de agregar la sustancia en el software, pues Ansys ya cuenta con este fluido y sus propiedades en su base de datos.

Todas las entradas del sistema se conocerán como *Velocity-Inlets* (VI, plural: VIs). Un VI necesita input de velocidad de flujo y composición. La razón por la que se usan VI es que el manual de Ansys lo recomienda para fluidos incompresibles en los que se conoce la velocidad de entrada [59].

Todas las salidas de fluido líquido del sistema se conocerán como *Mass-Flow-Outlets* (MFO, plural: MFOs), su programación se da proveyendo un valor de flujo másico. Normalmente cuando se tienen VIs, se suelen usar *pressure-outlets*, sin embargo, cuando se usaba esta opción, por motivos que no se pudieron resolver por completo, la simulación resultaba en un error por exceso de *backflow*, que en pocas palabras es una acción que toma el software cuando la simulación detecta problemas en el perfil de presión y devuelve el fluido en vez de dejarlo salir. Por ello tras evaluar un gran número de soluciones, usar MFOs resultó ser lo más efectivo. Todas las salidas de fluido gaseoso del sistema se conocerán como Fans (ventiladores).

Para el período de definición del diseño a usar se usaron condiciones constantes con la sola intención de conseguir una dirección de flujo ideal. Para medir esto se usó una herramienta gráfica del programa llamada *Pathlines* (líneas de ruta), estas líneas como

se verá más adelante muestran el camino que el fluido toma a través del separador. Con estos flujos el tanque se llenaba en unos 30 segundos.

Las condiciones fueron:

- Flujo *oil*: 0,4 m/s.
- Flujo *water*: 1,0 m/s.
- Flujo MFO_1: 99,82 kg/s.
- Flujo MFO_2: 89,838 kg/s.
- Flujo MFO_3: 9,982 kg/s.
- Flujo *outlet_oil*: 67 kg/s.
- Flujo Fans: 0 kg/s.

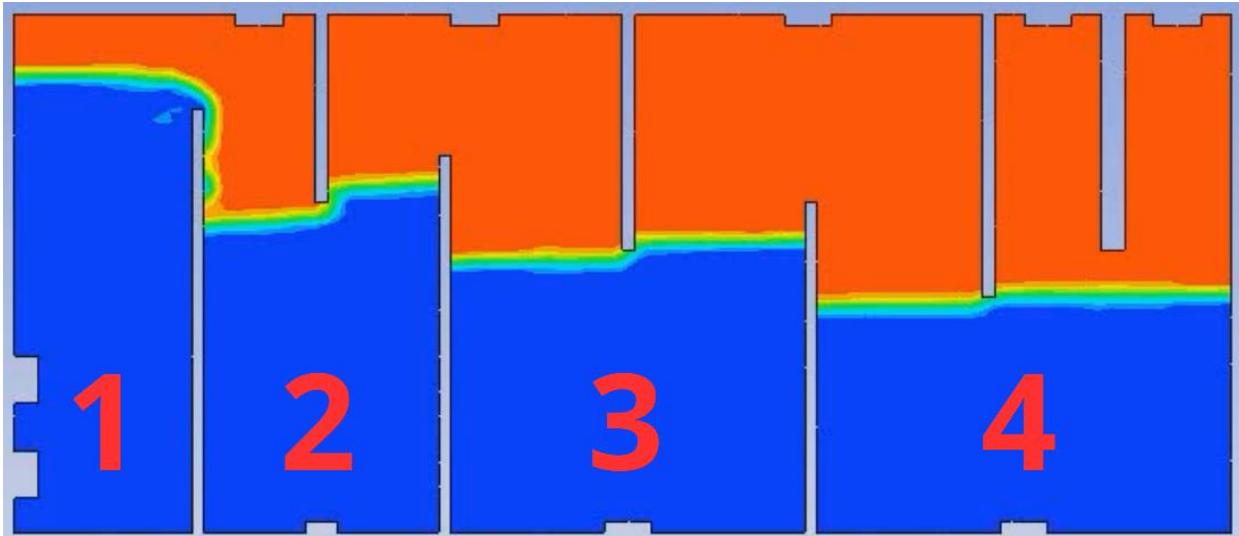
Estas condiciones se eligieron pseudo-arbitrariamente con el motivo de visualizar los *Pathlines*, y definir mediante prueba y error un diseño físico adecuado.

7.2. Diseño original

El diseño nace del concepto explicado en la Figura 11, donde se percibe que la separación se da en varias secciones. Esta idea se modificó agregando paredes verticales en el techo con la intención de dirigir el flujo y obtener una mejor separación; todo en base a ideas extraídas del conocimiento del funcionamiento de los separadores actuales [33], [60]–[66].

Figura 29.

Diseño original de la unidad central de separación (UCS).



Nota. La imagen se tomó en CFD-Post, esa es la razón de que los colores se vean distintos; el azul representa fluido, mientras que el naranja/rojo representa aire, el verde/amarillo representa la interfaz. A pesar de los cambios futuros, la unidad separadora siempre tendrá 4 divisiones.

En la sección 1 del separador se pueden identificar dos entradas rectangulares, la entrada superior es un VI de aceite, y la inferior un VI de agua; la razón por la que se tienen dos entradas en lugar de una es un problema encontrado en el programa a la hora de asignar más de un tipo de flujo en un único VI; este problema no tiene solución evidente en la literatura, se comprendió en el proceso de simulación y se aplicó la solución de separar los flujos en dos entradas

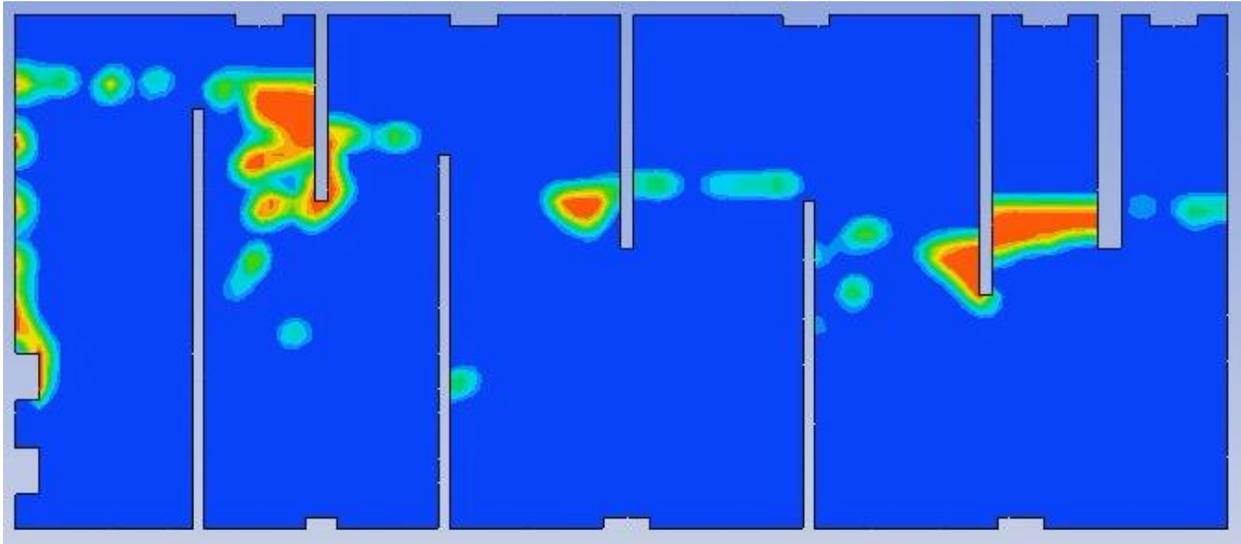
Todos los rectángulos ubicados en el piso del separador son MFOs; el de la sección 2 es el MFO_1, el de la sección 3 es el MFO_2, y el de la sección 4 es el MFO_3. Todos los rectángulos con forma similar a los inlets y outlets explicados son Fans. El rectángulo largo y un poco más grueso que las paredes de la sección 4 es el *outlet_oil*.

El problema de este diseño en la Figura 30, fue que el diésel se estancaba detrás de cada pared de techo, particularmente en la última pared había indicios de que el fluido no lograría pasar si se dejara más tiempo. Sin embargo, en términos generales el flujo

se movía en forma razonablemente correcta, esencialmente haciendo un zigzag curvo de sección a sección.

Figura 30.

Diseño original con perspectiva de diésel.



Nota. En general, lo azul por debajo de lo naranja/rojo es agua, y por encima es aire, esto se referirá como *contour* (contorno) de ahora en adelante, es un tipo de gráfica que permite ver un perfil deseado, en este caso, diésel.

7.3. Evolución del diseño

A continuación, en la Figura 31 se muestra la evolución del diseño del separador en un collage de 9 imágenes. Esta evolución muestra la introducción de rasgos adicionales mecánicos que permiten encontrar mejoría en el funcionamiento del equipo.

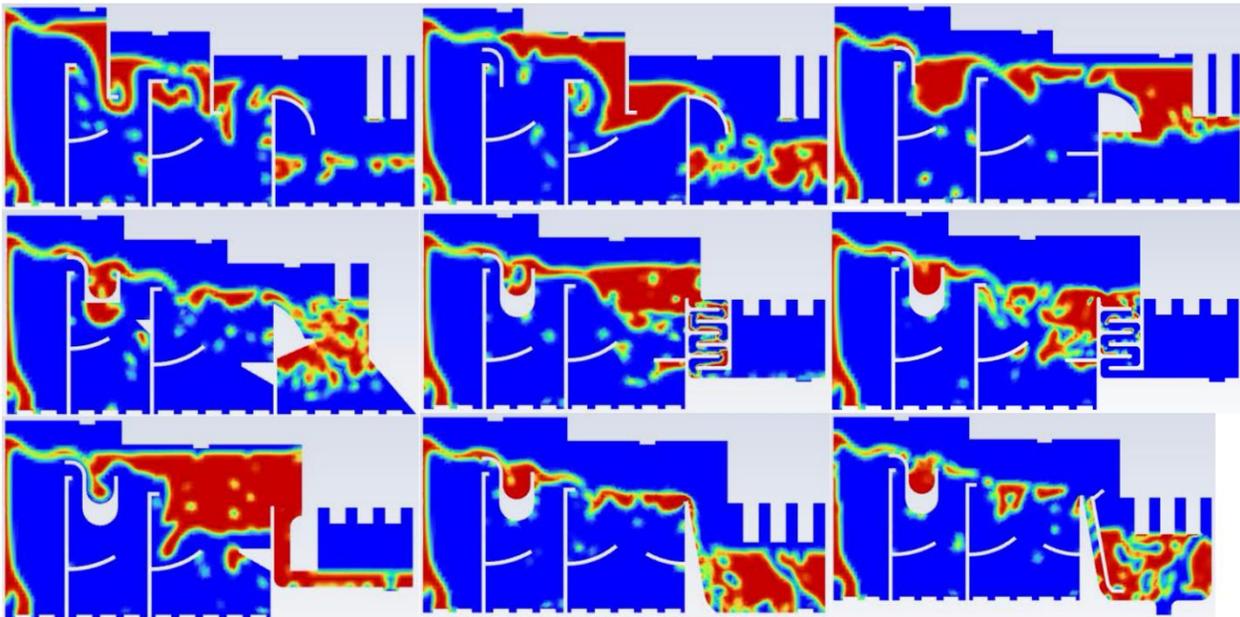
Para contexto, se hizo una evaluación a través de los próximos diseños de dónde debería estar el MFO en la zona inferior. En la sección 2 se encuentran 3 MFOs, en la sección 3 se encuentran 3 MFOs, y en la sección 4 se llegan a encontrar 5 MFOs hasta el diseño 5, y luego 1 MFO del diseño 6 en adelante. Se hicieron varias iteraciones en los diseños prometedores donde se abrían diferentes salidas para encontrar los mejores *pathlines*.

- Diseño 2:

En comparación con el diseño original, hay muchos cambios inmediatos en este diseño. En primer lugar, las paredes de piso obtuvieron un *lip* (borde) en el pasaje de una sección a otra. Se agregaron unas “rampas” curvas con la intención de que, si el diésel venía con mucho impulso hacia abajo, el flujo se redirigiría hacia arriba. La pared de la sección 4 fue removida para evitar el problema mencionado anteriormente, y se agregó un *lip* curvo para que el fluido entrara de forma menos turbulenta. Adicionalmente, el techo fue levantado en la primera sección y bajado en las subsecuentes secciones, con la intención de que el fluido nunca toque el techo, ahorrando *material* en el proceso.

Figura 31.

Evolución del diseño en 9 imágenes.



Nota. Contours de diésel; el orden es: primera fila de izquierda a derecha son los diseños 2, 3 y 4, segunda fila, los diseños 5, 6, y 7, tercera fila los diseños 8, 9 y 10; en anexo podrá verse cada imagen por separado en mayor tamaño. Ver Anexo 2.

El problema de este diseño es que en las secciones 2 y 3 hubo gran embotellamiento de diésel por lo que a pesar de que la separación pareciera decente, se definió que al menos la primera pared de techo era un problema.

- Diseño 3:

Para este modelo, se eliminó la primera pared de techo. Se agregó una pared curva flotante en la transición de la sección 1 a la 2, la idea era lograr una separación primaria donde el aceite se desplazará por arriba, y el agua por abajo.

El problema de este diseño es el tema recurrente, las paredes de techo no son efectivas, tapan el flujo; haciendo eso a un lado, la separación sigue indicando ser satisfactoria a pesar de tener algunas pérdidas.

- Diseño 4:

Se elimina la última pared de techo. Se agrega una rampa plana opuesta a la otra (rampa curva) en la sección 3 del separador, la intención fue evitar que el fluido sea presionado a bajar por proximidad a la pared y los *pathlines*. Adicionalmente el *lip* curvo de la sección 4 se rellena para que no haya fluido atrapado adentro.

El resultado fue interesante, pues sí pareciera reducirse la pérdida en la sección 3, pero se encontró acumulación en una zona de poca movilidad en la sección 4, la cual dejaba la zona en la que se succiona el aceite, con mínima cantidad de la sustancia.

- Diseño 5:

Se podrán identificar cambios considerables entre este diseño y el anterior, este es la primera y última versión del diseño de “tren”. El primer cambio fue la adición de un *lip* triangular en la sección 2, también se modificó el *lip* de la sección 3 volviéndolo triangular, el motivo de esto era lograr que el fluido no se acumule por debajo sin poder escapar, algo similar se hace para el *lip* curvo de la sección 4, además de darle un radio menor para que el espacio entre el desemboque y el *outlet_oil* sea un poco mayor. Adicionalmente, se extendió la forma de la pared flotante de la sección 2, la idea siguió siendo la misma, pero se esperaba que el bulto formado en esa misma zona en el diseño 4 fuese contenida y no estuviese peligrosamente muy cerca del *pathline* de agua.

El diseño presentó 3 problemas, el primero es que el *lip* triangular agregado en la sección 2 tuvo un efecto contrario al esperado, ya que parecía redirigir el diésel hacía abajo; el segundo fue en las secciones 2 y 4, debajo de las estructuras planas había mucha acumulación; el tercero, y el más importante, el objetivo de las secciones 2 y 3 era calmar

el fluido, que dejara de ser tan turbulento, pero este no fue el efecto conseguido, pues la sección 4 resulta claramente muy turbulenta.

- Diseño 6:

En base a la información del diseño anterior se borró el *lip* triangular de la sección 2 y se agregó un arco a la pared flotante para evitar acumulaciones, y más importantemente, se propuso una re - imaginación de la sección 4, usando una estructura de serpentín con la intención de calmar el fluido.

La idea estaba bien orientada, pero fue encontrada con un problema que fue difícil de definir si era físico o de simulación, pues al fluido le costaba fluir por la sección, lo cual generaba el tema recurrente, congestión.

- Diseño 7:

Poca diferencia entre este diseño el anterior, simplemente se intentó abrir un poco la entrada al serpentín de la sección 4, curiosamente pareció tener un efecto más negativo, tanto en congestión como en pérdidas en la sección 3.

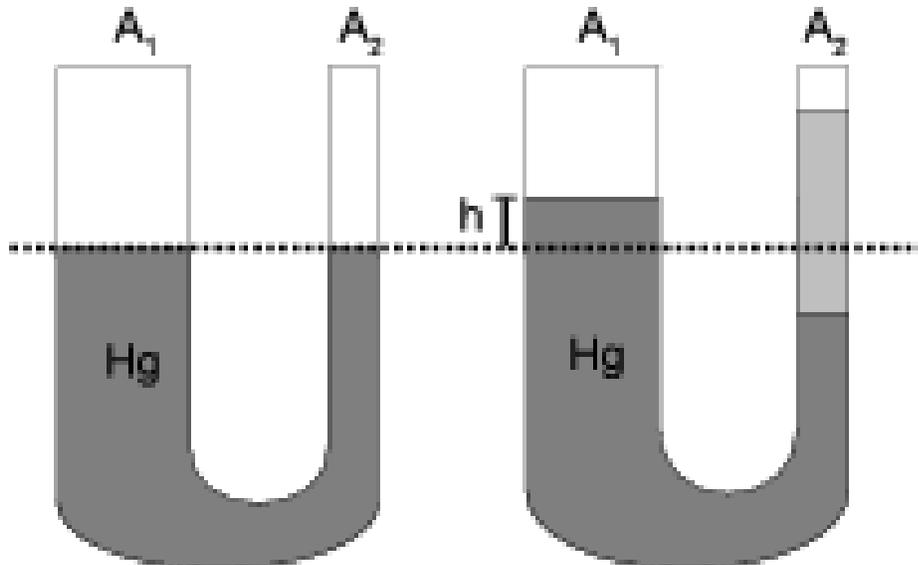
- Diseño 8:

La idea del serpentín fue rechazada, pero se intentó mantener el concepto de una entrada a la sección 4 en la que el fluido ingresa por debajo, para no aumentar la turbulencia en la superficie.

Fue este diseño el que finalmente dio a entender el verdadero motivo del embotellamiento, en la Figura 32 se podrá visualizar el efecto que sucede cuando se separa el ambiente del fluido con paredes de techo.

Figura 32.

Clásico experimento físico de tubo en U.



Nota. Se muestra la imagen completa para dar a entender el experimento del que se habla, pero el dibujo importante es el de la izquierda. Tomado de: Elevación de mercurio en un tubo en U [En línea] Disponible: http://tesla.us.es/wiki/index.php/Elevaci%C3%B3n_de_mercurio_en_un_tubo_en_U [accedido: oct.31.2023]

El efecto que ocurre en el dibujo de la izquierda en la Figura 32 se da debido a la presión atmosférica, en pocas palabras, la presión que ejerce el aire por cada metro cuadrado es constante, por lo que el fluido se mantiene a la misma altura sin importan el diámetro del tubo. En el caso del separador, cuando la sección se dividía con una pared de techo, era como crear una nueva atmósfera en la siguiente sección, entonces el fluido entrante era presionado equitativamente, y no permitía que subiera más allá de la altura de la entrada para este diseño; y en el caso de los otros diseños, dificulta el paso.

- Diseño 9:

En este diseño se usó una aproximación similar a la inicialmente propuesta en el diseño 4 donde se provee una curva para que el fluido entre con menor turbulencia, tomando en cuenta las modificaciones exitosas de los diseños 5 al 8, y abriendo la sección 4 para que comparta la atmósfera de todo el separador.

Hubo 2 problemas menores, el primero es que a pesar de que el flujo entraba con poca turbulencia, al entrar agitaba la superficie, lo cual no es conveniente; el segundo es un poco extraño, pues se puede ver una especie de columna de agua que se origina desde el MFO_3 hasta el *outlet_oil* central, se cree que este problema es un comportamiento no real creado por el simulador, pues en términos físicos no es muy lógico.

- Diseño 10:

Para solucionar el primer problema explicado en el diseño anterior se añadió una pared que lidere al fluido hacia la parte inferior de la sección 4, por lo que al entrar en teoría sólo debería agitar esa sección al principio y luego debería ser más estable; se aseguró de mantener conectadas las secciones a una misma atmósfera. Para el segundo problema se intentó modificar la forma del MFO_3, en lugar de que fuese una protuberancia, se convirtió en un desagüe.

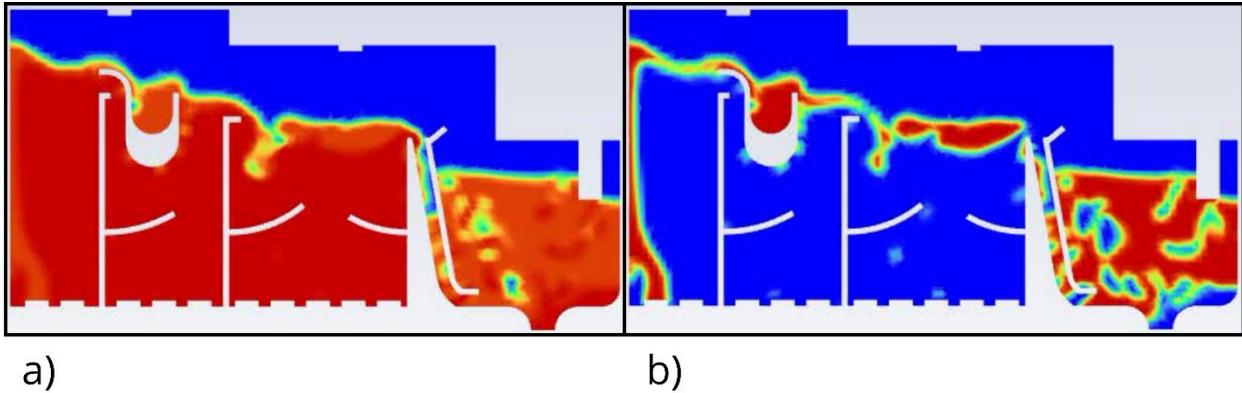
El último problema es la presencia de esa extraña columna de agua, pues la turbulencia pareció ser propiamente apaciguada.

7.4. Diseño seleccionado

Para resolver el último problema del diseño 10 y volver un poco más estética la sección final se eliminaron los primeros 2 *outlet_oil* de izquierda a derecha y se hizo una transición más suave en el desagüe de MFO_3. En la Figura 33 se puede ver cómo resulta el diseño final.

Figura 33.

Diseño de separador seleccionado tras evolución.



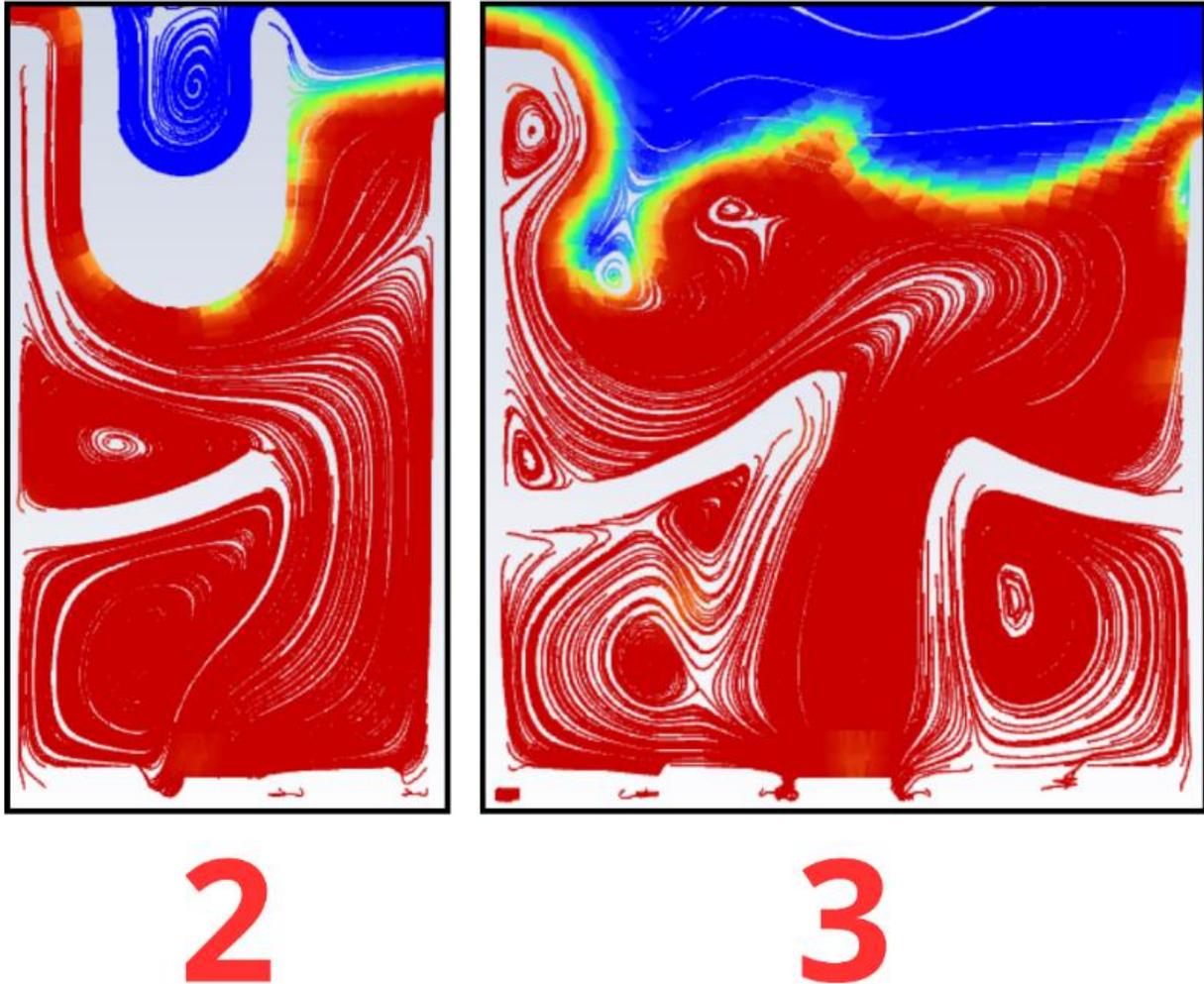
Nota. (a) Contour de densidad: Lo rojo es agua, lo naranja es diésel, lo azul es aire, lo amarillo es interfaz entre aire y líquido; (b) Contour de diésel: Lo rojo es diésel, lo azul por debajo suele ser agua, aunque en la sección 4 bastantes de las burbujas son de aire.

Como se puede ver en la segunda mitad de la Figura 33, el diésel a través de las secciones 2 y 3 se mantiene mayoritariamente en la parte superior, y discerniendo entre la mitad superior e inferior, la sección 4, en lo que corresponde a la zona directamente contigua al *outlet_oil*, la composición es en gran parte aceite.

Como mencionado en la sección 7.1 del documento, la decisión final de usar este diseño termina recayendo en los *pathlines*, que pueden apreciarse en la Figura 34.

Figura 34.

Pathlines de secciones 2 y 3 del diseño seleccionado.



Nota. Contour de densidad; Lo rojo es agua, lo naranja es diésel, lo azul es aire, lo amarillo es interfaz entre aire y líquido.

En general, los *pathlines* tendían a generar remolinos en lugares inconvenientes, lo cual obligaba al diésel a tomar rutas indeseables. En el caso de la Figura 34, en gran parte se garantiza que el flujo entrante por arriba, particularmente el que por densidad se quedaría en la zona superior, tienen un flujo constante hacia adelante.

Una tercera consideración para optar por este diseño fue tiempo, como se verá más adelante, determinar un diseño era necesario para siquiera iniciar el experimento.

7.5. Simulación de escenarios

7.5.1. ¿Qué son los escenarios?

El objetivo del experimento a desarrollar es definir las condiciones óptimas de operación del separador, y para ello se evaluaron distintas velocidades y composiciones del flujo. En la tabla 1 se listan las combinaciones de velocidad y composición evaluadas. Las velocidades son la forma en la que se digita el flujo másico al software de simulación, el impacto del flujo es directo en la turbulencia, la razón por la que se usan estas velocidades es un intento en simular la percepción de turbulencia dentro del separador según la velocidad a la que se esté moviendo el barco, condiciones climáticas, etc. Las composiciones corresponden a la cantidad de derrame que se consiga en día 0 vs día 10 (por ejemplo), entendiendo que con el paso del tiempo el derrame se vuelve una especie de nata en la superficie de la zona afectada [67]; el porcentaje hace referencia a la cantidad de aceite en comparación con el total de fluido entrante.

Tabla 1.

Escenarios posibles.

Escenarios	1	2	3	4	5
Velocidad (m/s)	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
Composición (% Oil)	30	20	10	5	1
Escenarios	6	7	8	9	10
Velocidad (m/s)	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
Composición (% Oil)	30	20	10	5	1
Escenarios	11	12	13	14	15
Velocidad (m/s)	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
Composición (% Oil)	30	20	10	5	1
Escenarios	16	17	18	19	20
Velocidad (m/s)	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0
Composición (% Oil)	30	20	10	5	1

Nota. Las 4 velocidades son 0,5, 1,0, 1,5 y 2,0 m/s, las 5 composiciones son 30, 20, 10, 5 y 1 %Oil; estas variables se combinan en todas las formas posibles, creando 20 escenarios.

Considerando todas las composiciones, las velocidades ofrecen los siguientes flujos máxicos en el simulador:

- 0,5 m/s: 95 – 100 kg/s.
- 1,0 m/s: 190 – 200 kg/s.
- 1,5 m/s: 285 – 300 kg/s.
- 2,0 m/s: 388 – 399 kg/s.

A continuación, la tabla 2 se detalla el método de procesamiento de información de las simulaciones.

Tabla 2.

Procesamiento de información de las simulaciones.

PRE SIM								
INLET						OUTLET		
Escenarios	Velocidad (m/s)	% Oil	Masa Oil (kg/s)	Masa Water (kg/s)	Masa Total (kg/s)	Outlet 1 (kg/s)	Outlet 2 (kg/s)	Outlet 3 (kg/s)
POST SIM								
NO RETURN ZONES								
NRZ 1 (kg/s oil)	NRZ 1 Acumulado (kg oil)		NRZ 1 (% perdido)	NRZ 2 (kg/s oil)	NRZ 2 Acumulado (kg oil)	NRZ 2 (% perdido)		
LAST SECTION								
Masa Oil (kg)	Masa Water (kg)	Masa Water Top (kg)	Masa Water Bot (kg)	Eficiencia Decantación (%)	Tiempo de Llenado (s)	Tiempo Total (s)		
RESULTADOS								
EFICIENCIA DEL PROCESO						COMENTARIOS		
Oil Recovered (kg/s)	Eficiencia Oil (%)	Potencial Diario (Barriles)	Oil/Water Ratio	Water Recovered (kg/s)	Eficiencia Water (%)			

Nota. Detalles de planeación de hoja de cálculo planeadas para el análisis de resultados, secciones: PRE SIM, POST SIM, y RESULTADOS. Para tabla completa ver Anexo 2.

La primera sección de la tabla 2 hace referencia a la información con la que se cuenta antes de arrancar la simulación, las variables velocidad y composición son independientes; masa *oil* y masa *water* se obtienen a partir de los valores de velocidad ingresados, masa total es la suma de las masas; outlet 1, 2 y 3 corresponden a MFO_1, MFO_2 y MFO_3, adicionalmente, la distribución para estas salidas fue de 50%, 45% y

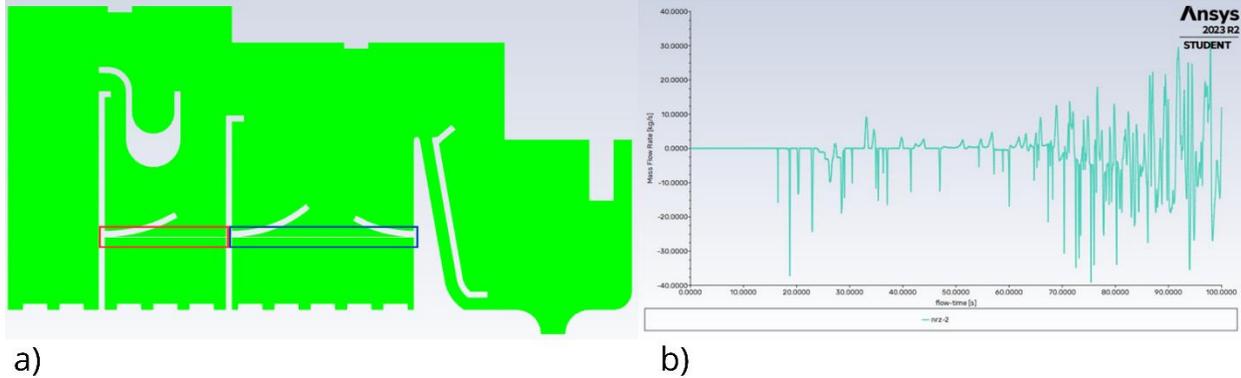
5%, en otras palabras, el comportamiento esperado era que del 100% del agua entrante, sólo el 5% pudiera llegar a la última sección.

La segunda sección de la tabla 2 hace referencia a información que se debe extraer, procesar y anotar. Esta sección se divide en dos subsecciones: NO RETURN ZONES (NRZ) y LAST SECTION.

La primera subsección hace referencia a una zona especial creada para poder definir qué porción del aceite que ingresa a este sector, se puede considerar como fluido perdido en el proceso. Para evaluar esto se generó una línea (que realmente es una superficie entendiendo que el modelo es 2.5D) con la que el programa reportó transferencias de aceite hacia o desde este sector, esta información fue procesada con un asistente desarrollado con ayuda de código de Python para obtener el valor numérico deseado; en la Figura 35 se puede identificar las líneas que delimitan los NRZ y ver el tipo de gráfica que el software reporta para cada NRZ, en la Figura 36 se puede ver el código de Python usado para procesar esa información. La información procesada se escribe en las columnas de "NRZ 1 Acumulado" y "NRZ 2 Acumulado", automáticamente se calcula el flujo másico perdido y el porcentaje del flujo total perdido usando otra información que aparece en la tabla.

Figura 35.

Líneas delimitadoras de zonas NRZ 1 y NRZ 2/Gráfica de resultados NRZ.



Nota. (a) El recuadro rojo delinea NRZ 1, el azul delinea NRZ 2; se ve como una línea, pero pensando que la superficie verde tiene profundidad de 1 metro, la línea es realmente una superficie que se extiende 1 metro en dirección perpendicular a la imagen. (b) Este ejemplo es una exageración de los resultados normales, extraído del experimento de 2,0 m/s, 1%Oil; número negativo indica que el desplazamiento es hacia abajo, positivo indica que se desplaza hacia arriba.

Figura 36.

Código de Python para procesamiento de información de NRZ.

```
1 import numpy as np
import pandas as pd

2 from google.colab import drive
drive.mount('/content/drive')

3 NRZ1 = "nrz-1-*.file.out"
NRZ2 = "nrz-2-*.file.out"
OILIN = "oil-in-*.file.out"
file_path = "/content/drive/MyDrive/tesis/NRZ2"
with open(file_path, "r") as out_file:
    file_lines = out_file.readlines()

4 print(file_lines)

Dataframe columns names:

5 iter_col = file_lines[2].split("\n")[1]
print(iter_col)

6 nrz_col = file_lines[2].split("\n")[3]
print(nrz_col)

7 time_col = file_lines[2].split("\n")[5]
print(time_col)

8 Lists of data from each column:

9 iteration_list = []
for i, numbers in enumerate(file_lines):
    if i == 0 or i == 1 or i == 2:
        continue
    iteration = int(file_lines[i].split()[0])
    iteration_list.append(iteration)
print(iteration_list)

10 nrz_list = []
for i, numbers in enumerate(file_lines):
    if i == 0 or i == 1 or i == 2:
        continue
    nrz = float(file_lines[i].split()[1])
    nrz_list.append(nrz)
print(nrz_list)

11 time_list = []
for i, numbers in enumerate(file_lines):
    if i == 0 or i == 1 or i == 2:
        continue
    time = float(file_lines[i].split()[2])
    time_list.append(time)
print(time_list)

12 df = pd.DataFrame((iter_col: iteration_list, nrz_col: nrz_list, time_col: time_list))
print(df)

13 def find_missing_number(numbers):
    for i in range(len(numbers) - 1):
        if numbers[i+1] != numbers[i] + 1:
            return numbers[i] + 1
    return None # No missing number found

14 # Example usage
missing_number = find_missing_number(df[iter_col])
print("Missing number:", missing_number)

15 mass_list = []
previous_time = 0
for i in df[iter_col]:
    current_time = df[time_col][i]
    time_step_mass = df[nrz_col][i] * (current_time - previous_time)
    mass_list.append(time_step_mass)
    previous_time = current_time

16 diesel_lost = sum(mass_list)
print(f"La cantidad perdida en la duración de la sim es de: (diesel_lost) kg")
La cantidad perdida en la duración de la sim es de: -109.79089949469707 kg

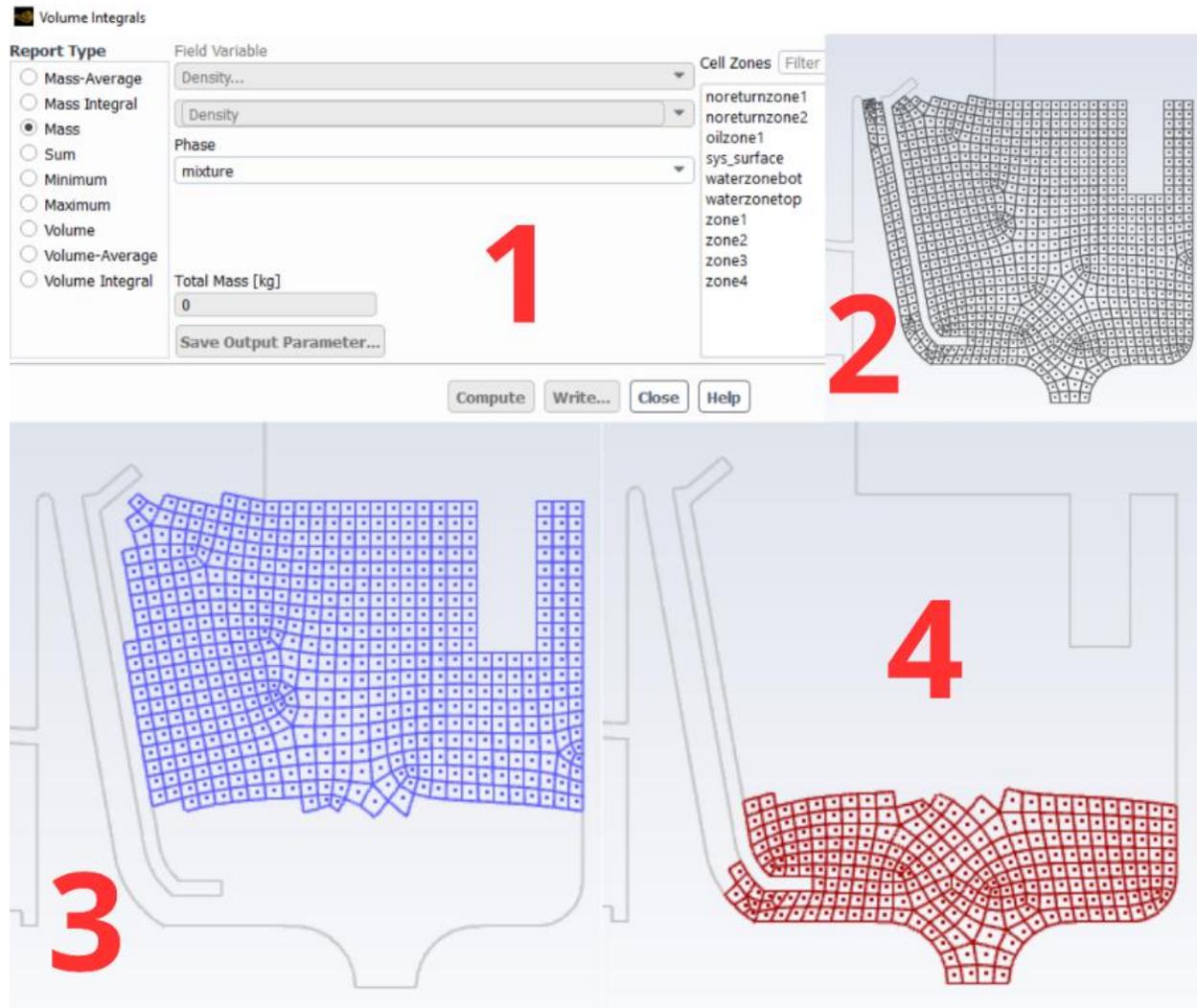
17 diesel_lost_flux = diesel_lost/df[time_col][len(time_list)-1]
print(f"El flujo de pérdida promedio es de (diesel_lost_flux) kg/s")
El flujo de pérdida promedio es de -1.0979089949469708 kg/s
```

Nota. La primera imagen establece las librerías, extrae la información de una carpeta y crea las columnas del dataframe; la segunda usa la información NRZ para crear listas de cada variable (iteración, valor NRZ, time stamp), y crea un dataframe con ellas; la tercera es la parte encargada de calcular la pérdida, la cual lo logra haciendo una sumatoria (de miles o decenas de miles) de valores. Ver Anexo 2.

La segunda subsección se puede visualizar mejor en la Figura 37; "Masa Oil" se calcula con **zone4**; "Masa Water Top" con **waterzonetop**; "Masa Water Bot" con **waterzonebot**; "Masa Water" se calcula como la suma de "Masa Water Top" y "Masa Water Bot"; la columna "Eficiencia Decantación", a menos que se diga lo contrario, se calcula como "Masa Water Bot" dividido "Masa Water" por 100%; el "Tiempo de Llenado" hace referencia al tiempo que toma la sección 4 de llenarse hasta la altura del *outlet_oil*, en el experimento, cuando el fluido llega a este punto de control, *outlet_oil* y MFO_3 son abiertos para que los *pathlines* se estabilicen; entonces, el "Tiempo Total" es el tiempo de llenado más el tiempo de estabilización, que suele ser 5 segundos para la mayoría de los experimentos.

Figura 37.

Interfaz Volume Integrals y zonas relevantes.



Nota. La primera imagen es la interfaz del software para la herramienta *Volume Integrals*, la cual calcula la cantidad de masa en un volumen seleccionado; la segunda imagen es el volumen designado como *zone4*; la tercera imagen es el volumen designado como *waterzonetop*; la cuarta imagen es el volumen designado como *waterzonebot*.

Finalmente, la tercera sección son resultados calculados a partir de toda la información anterior. La columna "Oil Recovered" es el flujo másico que en teoría estaría saliendo por el *outlet_oil*; la columna "Eficiencia Oil" se calcula como "Oil Recovered" dividido en "Masa Oil" de la sección INLET; La columna "Potencial Diario (Barriles)" se calcula como "Masa Oil" de la sección LAST SECTION dividido en el "Tiempo de Llenado", y este valor

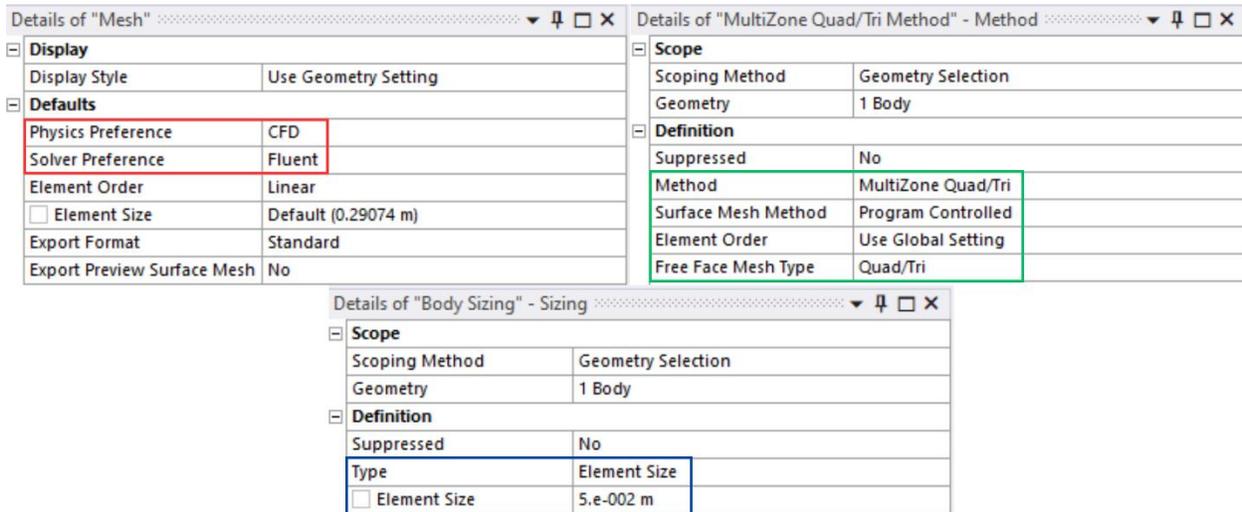
es convertido a Barriles/Día; La columna "Oil/Water Ratio" es simplemente una medida de cuántos kg de aceite hay por cada kg de agua, y es calculado con los respectivos valores hallados en LAST SECTION; La columna "Water Recovered" se calcula como el agua entrando al separador, reportada en la sección PRE SIM, menos el agua de una de dos zonas: Si la "Eficiencia Decantación" está por encima del 87% se da por entendido que la decantación en la última sección es suficientemente óptima, por lo que es posible inferir que el agua en "Masa Water Bot" será recuperada correctamente, mientras que la de "Masa Water Top" tiene una alta probabilidad de ser perdida (succionada por el *outlet_oil*), en estos casos la zona a restar es la reportada en "Masa Water Top", en caso contrario al explicado, se usa "Masa Water" (LAST SECTION) para la resta; La columna "Eficiencia Water" es "Water Recovered" dividido en "Masa Water" (INLET); por último, la columna "Comentarios" son observaciones que se fueron haciendo a lo largo del proceso. Como dato extra, el 87% del cálculo de "Water Recovered" se obtuvo de forma experimental mediante numerosas simulaciones.

7.5.2. Mallado

En la Figura 38, se presentan las opciones manualmente modificadas a la hora de realizar el mallado del diseño seleccionado en la sección 7.4.

Figura 38.

Especificaciones del mallado en Ansys Fluent.

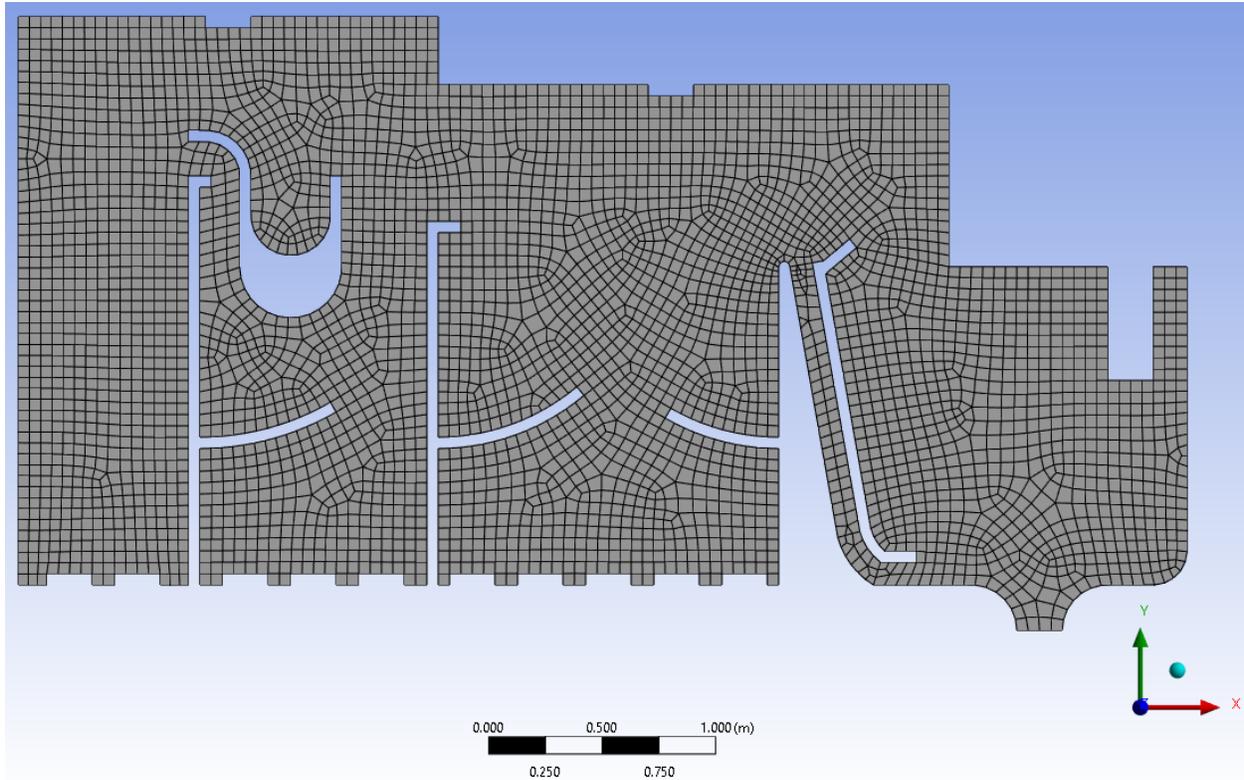


Nota. El recuadro rojo hace referencia a qué tratamiento se le hará a la figura; verde indica que el método de geometrías a usar es Quad/Tri, comprendido de cuadriláteros y triángulos; azul define el tamaño apuntado a cada geometría (5 cm).

En el recuadro rojo se resalta que la figura se tratará con CFD en la herramienta Fluent de Ansys, sin embargo, estas no son las opciones por defecto, por lo que se tuvo que modificar. La imagen del recuadro verde hace referencia a una herramienta del software que permite definir el tipo de geometría que cubrirá la superficie; para geometrías 2D sencillas se recomienda usar triángulos y/o cuadriláteros [68], la razón de usar ambos fue conveniencia geométrica, pues al intentar elegir la opción "All Quad", la cual solo permite cuadriláteros, muchas secciones de la superficie indicaban fallos en compleción, por otra parte, Quad/Tri ofreció un mallado satisfactorio. Por último, para el tamaño de las geometrías delineado en el recuadro azul se optó por 0.05 m que, a pesar de ser ligeramente grande, fue una necesidad por falta de potencia computacional; valores por debajo de este volvía el tiempo de simulación exponencialmente mayor sin aumentar significativamente la precisión de los resultados. A continuación, en la Figura 39, se presenta el mallado final generado en la aplicación.

Figura 39.

Mallado final de la superficie del diseño seleccionado.



Nota. La superficie yace en el plano XY, teniendo como eje de coordenadas (0,0) la esquina inferior izquierda. Aproximadamente 5000 celdas.

7.5.3. Configuración del modelo

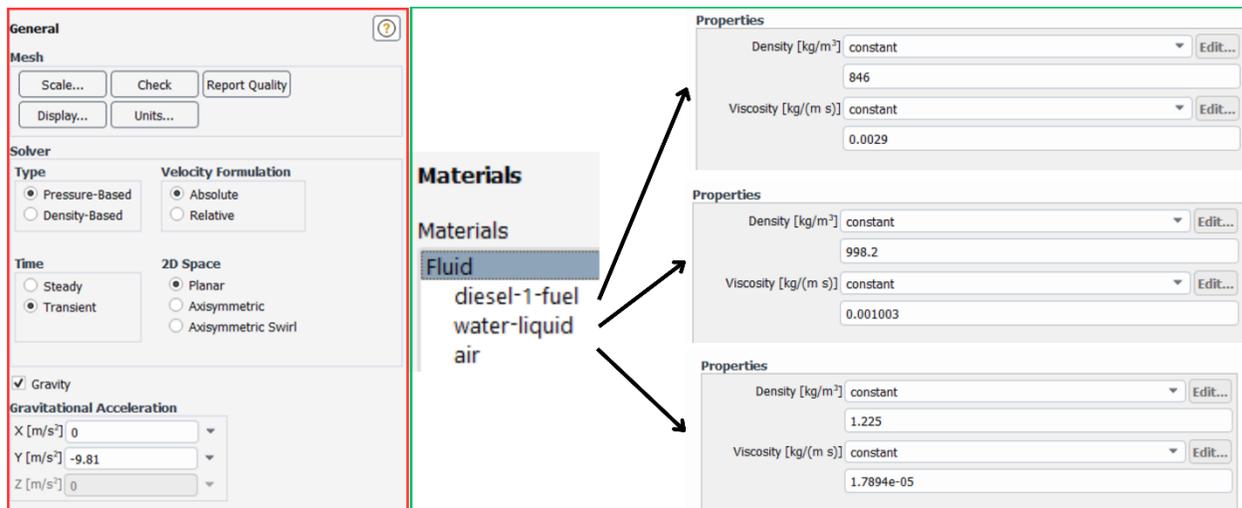
En la siguiente sección se mostrará cómo se configuró el modelo, se mostrarán todas las opciones seleccionadas para la configuración del modelo, es decir, estas opciones determinan las ecuaciones que el software usará para resolver cada problema que se encuentre; adicionalmente determinan las condiciones de operación del sistema. Se dará la justificación de las opciones seleccionadas, pero cabe aclarar que en algunos casos opciones no se evaluaron porque la literatura indicaba que era prerequisite ser experto en el tema para manipularlas. A continuación, la Figura 40 muestra las opciones generales del ambiente de simulación, así como los fluidos usados y sus propiedades.

Se presentan dos tipos de *solver*: *Pressure-Based* y *Density-Based*. El primero es usado para flujos incompresibles de bajas velocidades (por debajo de Mach 0.3), el segundo es

usado para flujos compresibles de altas velocidades [69], por ello se selecciona el *Pressure-Based solver*. La formulación de velocidad hace referencia al dominio del flujo, si éste está rotando, es relativo, si no, es absoluto [69], dado que el dominio es estático, la opción seleccionada es *Absolute*. Un flujo *Steady* (estable) es aquel en donde su velocidad, presión, densidad, etc., son constantes en cualquier punto con el paso del tiempo; *Unsteady* o *Transient* (inestable o transitorio) hace referencia al caso contrario, en este sistema se hacen más cálculos, necesitando mayor poder de cómputo [69]. Dada la naturaleza de la simulación planteada, es requerido un sistema transitorio. Como mostrado en la Figura 40, los ejes de la superficie son XY, donde Y es el vertical, por lo que la gravedad debe digitarse con signo negativo.

Figura 40.

Opciones generales del ambiente de simulación/Propiedades de fluidos.



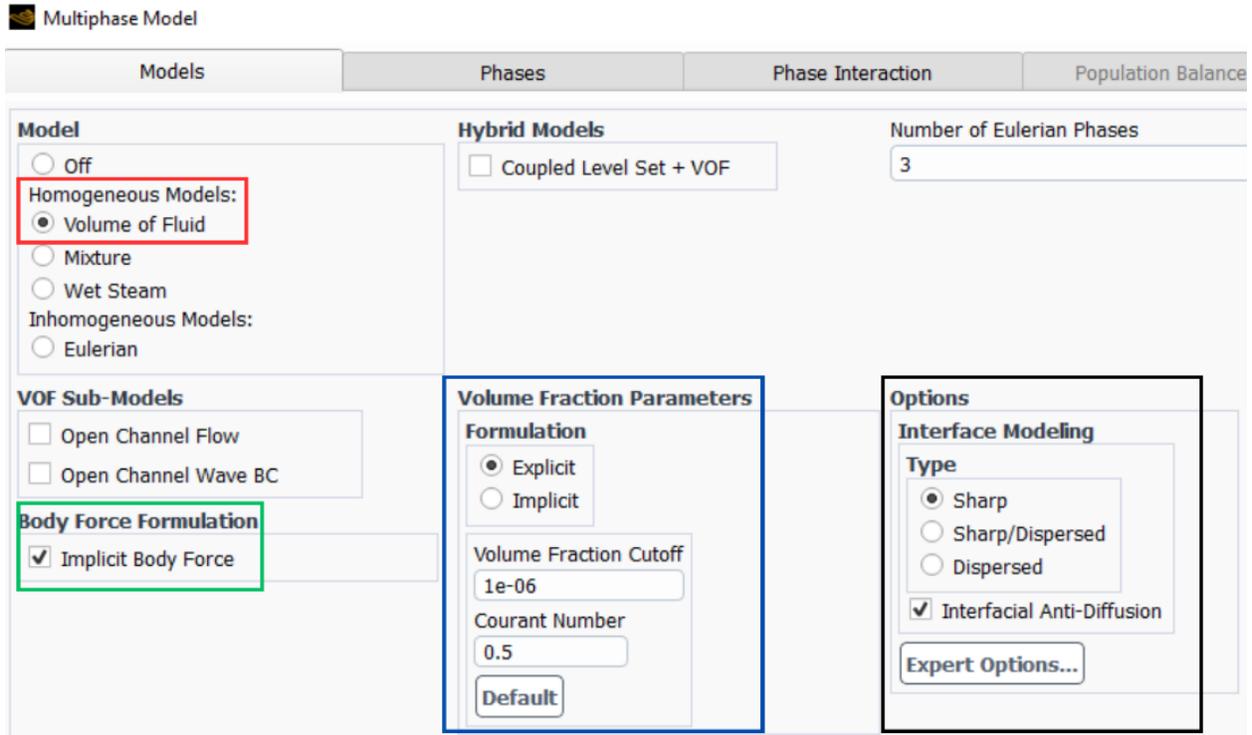
Nota. Recuadro rojo: Las opciones disponibles son el tipo de *solver*, la formulación de velocidad, el tipo de pasaje de tiempo, el tipo de superficie que se va a manejar, y la presencia o ausencia de gravedad; verde: Usando la base de datos de Ansys Fluent se consiguieron estos 3 componentes cuyas propiedades eran suficientemente cercanas a las deseadas.

En la introducción al documento se mencionó que el diésel pertenece al grupo 2 de los tipos de aceite que pueden ser encontrados en derrames, por lo que se consideró apropiado para el experimento. La presencia de aire como una de las fases es necesaria

a la hora de desarrollar simulaciones multifásicas, esto se explicará más adelante con la inicialización.

Figura 41.

Interfaz de selección de modelo multifase.



Nota. El recuadro rojo señala el modelo multifásico seleccionado; verde muestra una opción extra seleccionada; azul indica el trato interno que se le hará a la ecuación de fracción de volumen; negro señala la forma en la que se le hará seguimiento a la interfaz de los fluidos.

Ansys fluent usa la aproximación Euleriana para el modelado de sistemas multifásicos, esta se divide en dos: *Volume of Fluid* y *Mixture*; donde el primero considera interacciones de fase continuo-continuo, y la segunda considera interacciones disperso-continuo [70]. En pocas palabras, se usa disperso-continuo cuando hay presencia de partículas sólidas, y si bien eso podría ser una consideración para una simulación futura, no es relevante en este trabajo, por ello se seleccionó el modelo *Volume of Fluid*.

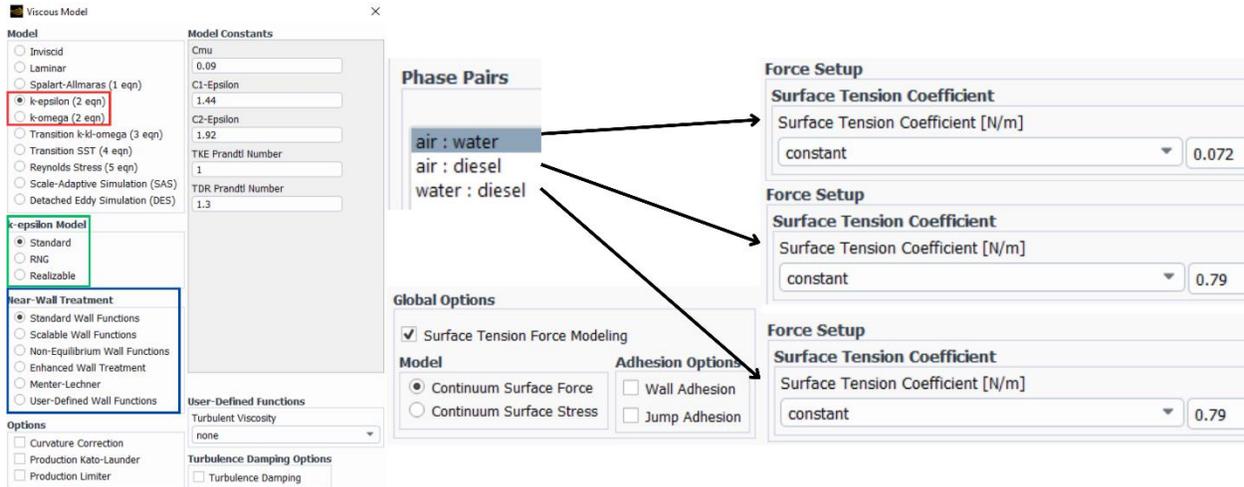
Combinado con la especificación de gravedad, *Implicit Body Force* hace una corrección a la ecuación de flujo, ayudando también el perfil de presión; esta opción suele usarse en flujos multifásicos para hacer que la solución sea más robusta. [71]

Los parámetros de *Volume Fraction* tienen dos formulaciones: Implícita o Explícita. La primera es que el software se encarga de los valores automáticamente; la segunda permite digitar los valores. No se pudo demostrar que haya diferencia notable de resultados tras elegir una o la otra, pero con la intención de modificar el número de Courant, se eligió Explícita. El *Volume Fraction Cutoff* es el límite de dígitos que la ecuación de volumen maneja, y se dejó por defecto [72]. El número de Courant es la distancia que el flujo se mueve por cada *time step* para resolver el sistema de ecuaciones [73], en este caso 0.5 indica que el flujo se mueve media celda por cada *time step*; este número es muy importante, la literatura recomienda para muchos casos que sea 1 o menor para resultados precisos y mejor convergencia [74], [75]; el valor por defecto es 0.25, pero se consideró muy pequeño puesto que mientras menor sea este número mayor es la demanda computacional, por lo que se subió a 0.5 para esta ecuación.

Por último, el modelamiento de la interfaz presenta 3 opciones: *Sharp*, *Sharp/Dispersed* y *Dispersed*. En resumen, *Sharp* es para interfaz líquido-líquido, *Dispersed* se usa cuando se tienen partículas sólidas o gaseosas en contacto con un flujo líquido, y la combinación permite un enfoque global [76]; la opción extra Interfacial Anti-Diffusion no tiene referencia en el manual, pero un artículo indicaba que era conveniente para casos con gotas de aceite en agua [77].

Figura 42.

Interfaz de selección de modelo de viscosidad/Tensiones superficiales.



Nota. El recuadro rojo señala los dos modelos evaluados, verde muestra los submodelos del modelo seleccionado, azul hace referencia al tratamiento cerca de la pared. Las tensiones se ingresan manualmente, dentro de la base de datos de Ansys Fluent se encuentran los valores usados; *Surface Tension Force Modeling* es una opción extra seleccionada.

Como se puede ver en la Figura 42, existen múltiples formas de modelar la viscosidad, en resumen, cada modelo tiene su propio sistema de ecuaciones. Los modelos evaluados son el *k-epsilon* y el *k-omega*, son los más comunes usados para simulaciones turbulentas. En el primero se tiene una ecuación de turbulencia k , y una de disipación de turbulencia ϵ , es un sistema “robusto, económico y preciso para un gran rango de flujos turbulentos” [78]; este modelo es recomendado simulaciones donde el y^+ es mayor a 30 con gradientes de presión pequeñas y Reynolds alto [79]; y^+ es una distancia adimensional entre la pared y el dominio del flujo [80]. En el segundo se sigue teniendo la ecuación de turbulencia k , pero se tiene una ecuación de disipación de turbulencia por unidad de energía cinética ω , que a fin de cuentas es ϵ dividido la energía cinética, también se conoce como escala de turbulencia; este sistema se usa geometrías complejas donde el tratamiento cerca de la pared es muy importante ($y^+ < 5$), y gradientes de presión considerables [81]. La literatura en general sugiere usar *k-omega* (SST, el submodelo estándar) para casos aerodinámicos, en donde lo que se quiere

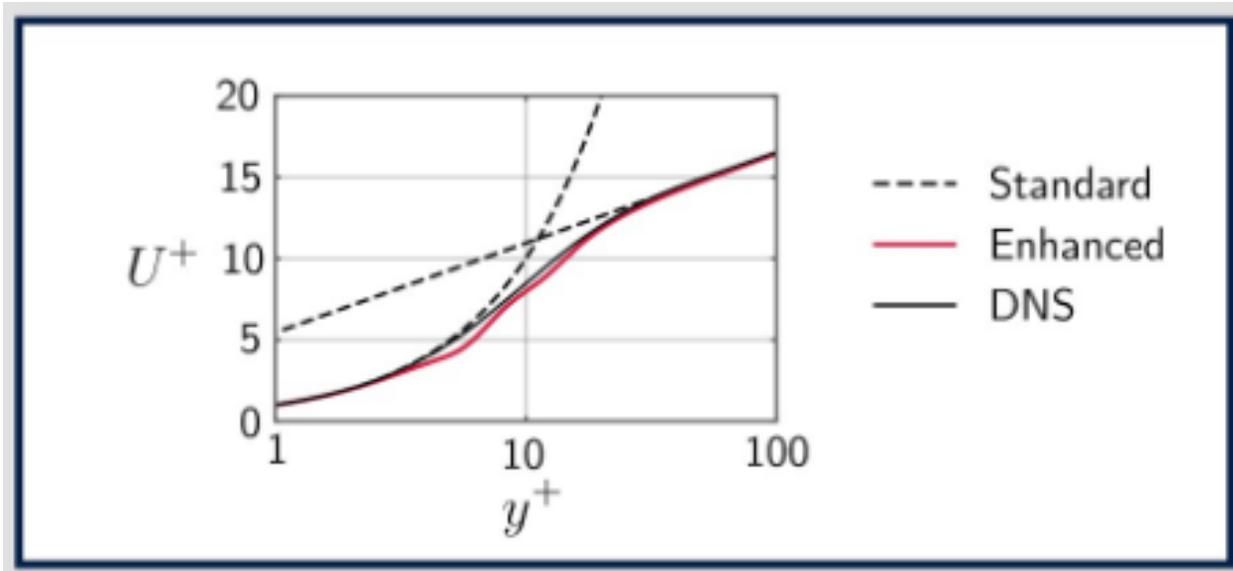
determinar es el perfil de presión y direcciones de flujo cerca de las paredes de la geometría, y que para el caso de este proyecto se use el modelo *k-epsilon* [78]–[86].

Existen 3 submodelos de *k-epsilon*: *Standard*, *Realizable* y *RNG*. El primero es el original, siendo un modelo semi-empírico con propiedades y funcionalidades explicadas anteriormente [78]; el segundo es una modificación que “predice con mayor precisión la tasa de dispersión *jets* planos y curvos. También es probable que proporcione un rendimiento superior para flujos que implican rotación, capas límite bajo fuertes gradientes de presión adversos, separación y recirculación” [87]; el tercero es otra modificación del original que es “más preciso y confiable para una clase más amplia de flujos que el *Standard*”, pero que requiere de mejor tratamiento cercano a la pared [88]. Sabiendo esto se puede descartar el *RNG* por su necesidad de control cercano a la pared, y lo lógico sería elegir el *Realizable*, que se describe como mejor que el *Standard*, sin embargo, la literatura indica que ambas opciones (*Realizable* y *RNG*) son menos estables que la *Standard* [75], por lo que, por falta de conocimiento y seguridad se eligió la *Standard*.

El tratamiento cerca de la pared se ve directamente relacionado con el y^+ mencionado anteriormente. Si el y^+ reportado está entre 0 y 5 (0 siendo la superficie de la pared) o de 30 para arriba, se recomienda usar Standard Wall Treatment, mientras que, si está entre 5 y 30 se debe usar Enhanced Wall Treatment, la justificación de esto se expresa en la Figura 43.

Figura 43.

Gráfica de comparación de Standard y Enhanced Wall Treatment.



Nota. La sigla DNS significa Direct Numerical Simulation; el método Standard falla entre 5 y 30, el Enhanced tiene una mejor aproximación en esta zona. [En línea] Tomado de: [CFD] Enhanced Wall Functions in ANSYS Fluent. Disponible: <https://www.youtube.com/watch?v=h5OiFpu0L4M> [accedido: sep.15.2023]

El DNS es un método en CFD donde “las ecuaciones de Navier-Stokes se resuelven numéricamente resolviendo todo el rango de escalas espaciales y temporales de turbulencia” [89]. El y^+ en este diseño no se pudo poner por debajo de 30 sin que el tiempo de simulación aumentara exponencialmente por exceso de celdas cerca de las paredes; el método de inflación de la Figura 44 generaba errores, por lo que se optó no usarlo.

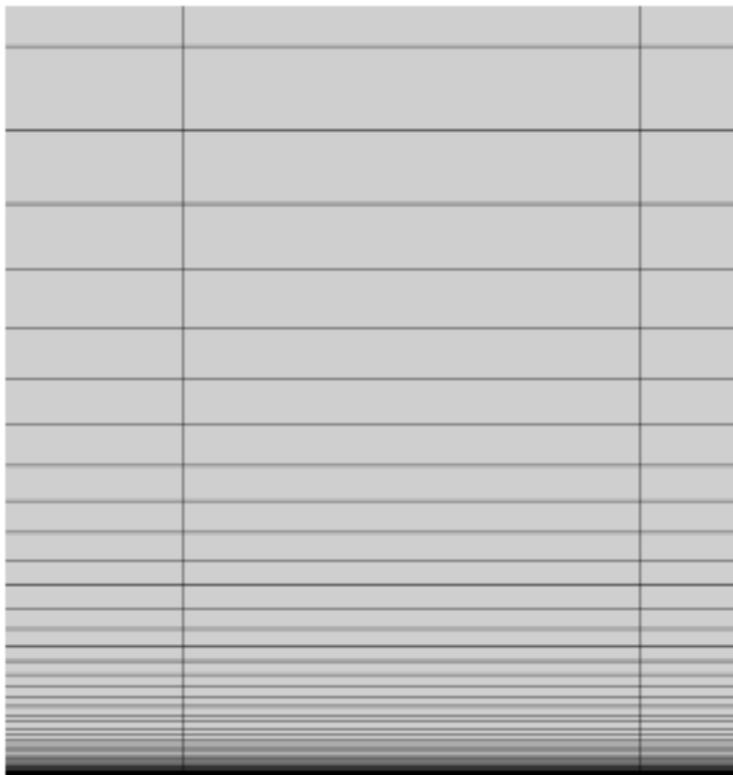
Las *Scalable Wall Functions* son una extensión de las *Standard Wall Functions* donde se le agrega un limitador ($y^* = 11.225$), la literatura no es muy clara en cuál es la ventaja de este enfoque [78], por lo que se opta por no usarlo.

Las Non-Equilibrium Wall Functions son “recomendadas para uso en flujos complejos que involucran separación, reunión y choque donde el flujo medio y la turbulencia están sujetos a gradientes de presión y cambios rápidos” [90], en la Figura 45 se puede

visualizar ejemplos de estos flujos. A pesar de que la literatura parece sugerir que este modelo es el que debería usarse, por motivos desconocidos, tiene efectos inexplicables en la simulación, en particular hace que el diésel se adhiera inseparablemente de las paredes, lo cual no es lógico al nivel al que sucede.

Figura 44.

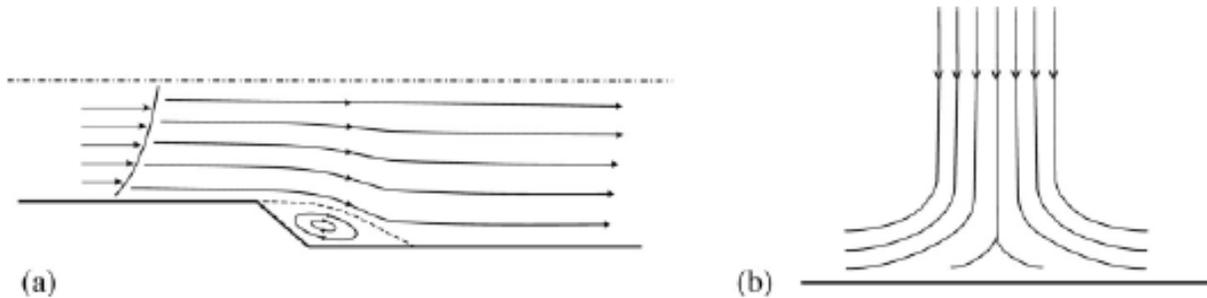
Inflación de celdas cercanas a la pared durante el mallado.



Nota. La parte inferior es la pared, iniciando con un tamaño muy pequeño, la inflación va aumentando el grosor de la celda conforme se alejen de la pared. Tomado de: Turbulence and CFD models: Theory and applications. [accedido: sep.15.2023]

Figura 45.

Ejemplos de flujos beneficiados de método Non-Equilibrium Wall Functions.



Nota. (a) Separación de flujo con zona de recirculación; (b) Choque de flujo. Tomado de: Computational Fluid Dynamics for Engineers. [accedido: sep.15.2023]

El método Menter-Lechner no es mencionado en el manual de Ansys, pero fuentes mencionan que es más propiamente usado en simulaciones LES (Large Eddy Simulation), donde los eddies pueden verse como torbellinos que se forman en el flujo, estos eddies son calculados explícitamente de forma independiente, aumentando enormemente el poder de cómputo necesario [91]. La simulación planteada es RANS (Reynolds-Averaged Navier-Stokes), la cual resuelve las ecuaciones del promedio de las cantidades del flujo, requiriendo considerablemente menos poder de cómputo que una simulación LES [91]; basado en esto y en la falta de información se considera que no sería apropiado usar este método.

Ansys permite que el usuario digite su propia función, por motivos evidentes no se tomó esta opción. Por último, se define por descarte usar las *Standard Wall Functions*, que deberían suplir correctamente las necesidades de la simulación.

Por último, la opción *Surface Tension Force Modeling*, usando *Continuum Surface Force*, hace que la interacción entre fluidos se comporte de manera constante en todos los puntos, esto se logra agregando un término extra a la ecuación de momento [92].

Figura 46.

Interfaces de inicialización y controles de la solución.

The image shows a software interface with two main panels: 'Solution Initialization' on the left and 'Solution Controls' on the right. The 'Solution Initialization' panel includes sections for 'Initialization Methods' (with 'Standard Initialization' selected), 'Reference Frame' (with 'Absolute' selected), and 'Initial Values' (with input fields for Gauge Pressure, X Velocity, Y Velocity, Turbulent Kinetic Energy, Turbulent Dissipation Rate, water Volume Fraction, and diesel Volume Fraction, all set to 0). The 'Solution Controls' panel includes 'Under-Relaxation Factors' with input fields for Pressure (0.3), Density (1), Body Forces (1), Momentum (0.7), Turbulent Kinetic Energy (0.8), Turbulent Dissipation Rate (0.8), and Turbulent Viscosity (1). Both panels have buttons for 'Initialize', 'Reset', 'Patch...', 'Default', 'Equations...', 'Limits...', and 'Advanced...'. There are also buttons for 'Reset DPM Sources', 'Reset LWF', and 'Reset Statistics' at the bottom of the 'Solution Initialization' panel.

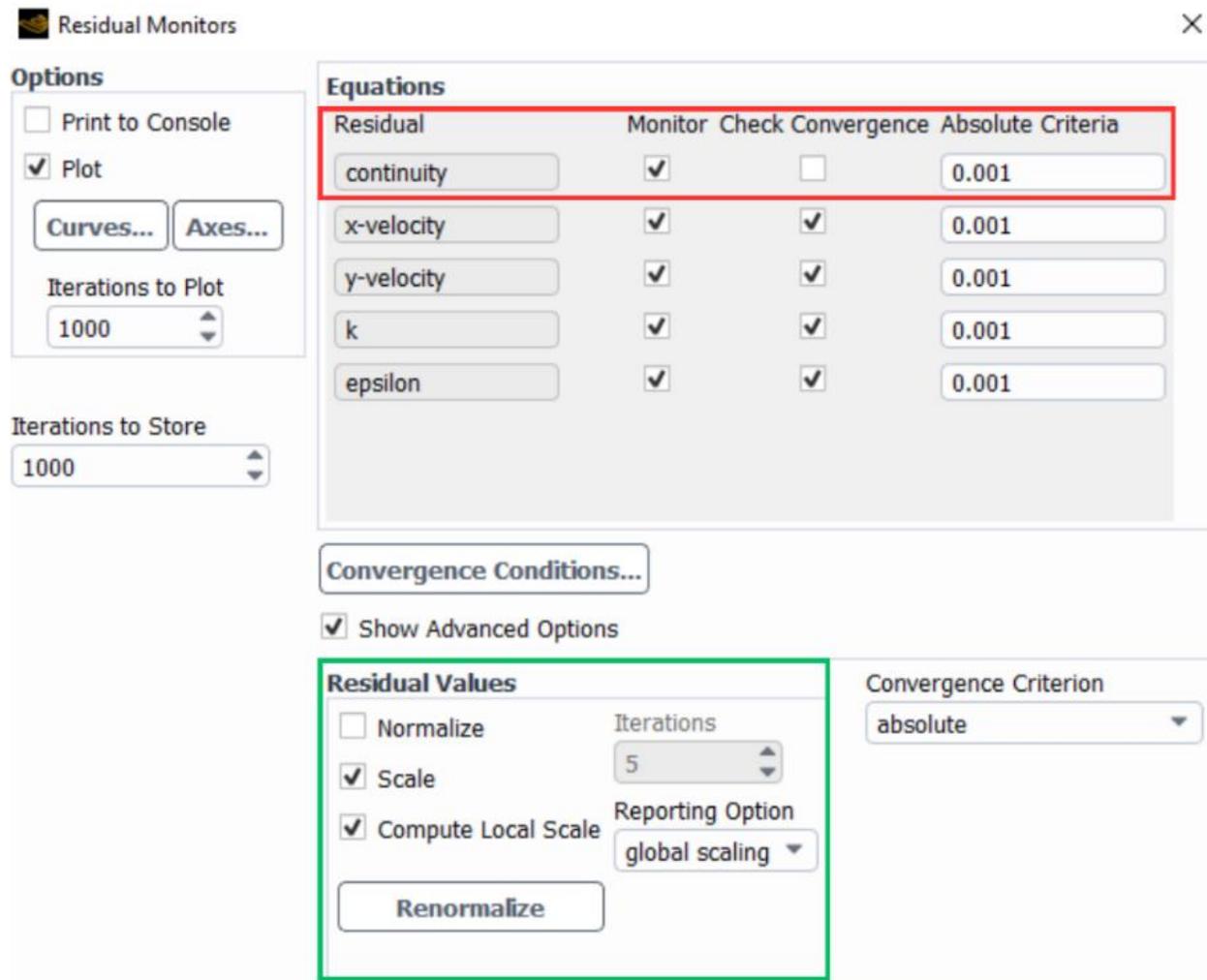
Nota. En la izquierda se tienen las opciones de inicialización de la solución, en la derecha se tienen los controles de la solución.

La inicialización permite que el usuario introduzca suposiciones de condiciones iniciales de lo que estima que los parámetros serían al converger. Estas opciones fueron dejadas por defecto, pues no había conocimiento previo de los posibles parámetros; adicionalmente, *Water Volume Fraction* y *Diesel Volume Fraction* son dejados en 0 para inicialmente llenar el separador con aire, el software demanda que se llene el espacio con algo antes de empezar a simular.

Los controles de solución son los valores que el software usa para estabilizar los cálculos si detecta que los números son más altos de lo que deberían, todos estos valores se dejaron por defecto.

Figura 47.

Interfaz de monitoreo de residuales.



Nota. El recuadro rojo señala un cambio manual hecho al monitoreo de la convergencia de la ecuación de continuidad, el recuadro verde muestra la opción seleccionada para el seguimiento de los residuales.

Existen varias formas de definir si una simulación está ofreciendo resultados precisos, una de ellas es el monitoreo de residuales [93]. La cantidad de residuales depende del modelo seleccionado, pues depende de la cantidad de ecuaciones que el programa debe

resolver, en este caso se tienen 5: Continuidad, velocidad-x, velocidad-y, turbulencia (k), disipación de turbulencia (épsilon). Normalmente se monitorean todas estas variables para confirmar la convergencia de la simulación, sin embargo, se detectó que el monitor de continuidad reportaba un error bastante bajo, pero le costaba converger rápidamente al *Absolute Criteria*, lo cual elongaba sustancialmente la duración de la simulación, para entender a qué hace referencia este valor se provee la Figura 48.

Figura 48.

Ecuación para calcular residuales del balance de masa.

$$\text{Cell 1} + \text{Cell 2} + \text{Cell 3} + \text{Cell n} = \sum_{\text{Cell 1}}^{\text{Cell n}} \text{Imbalances}$$

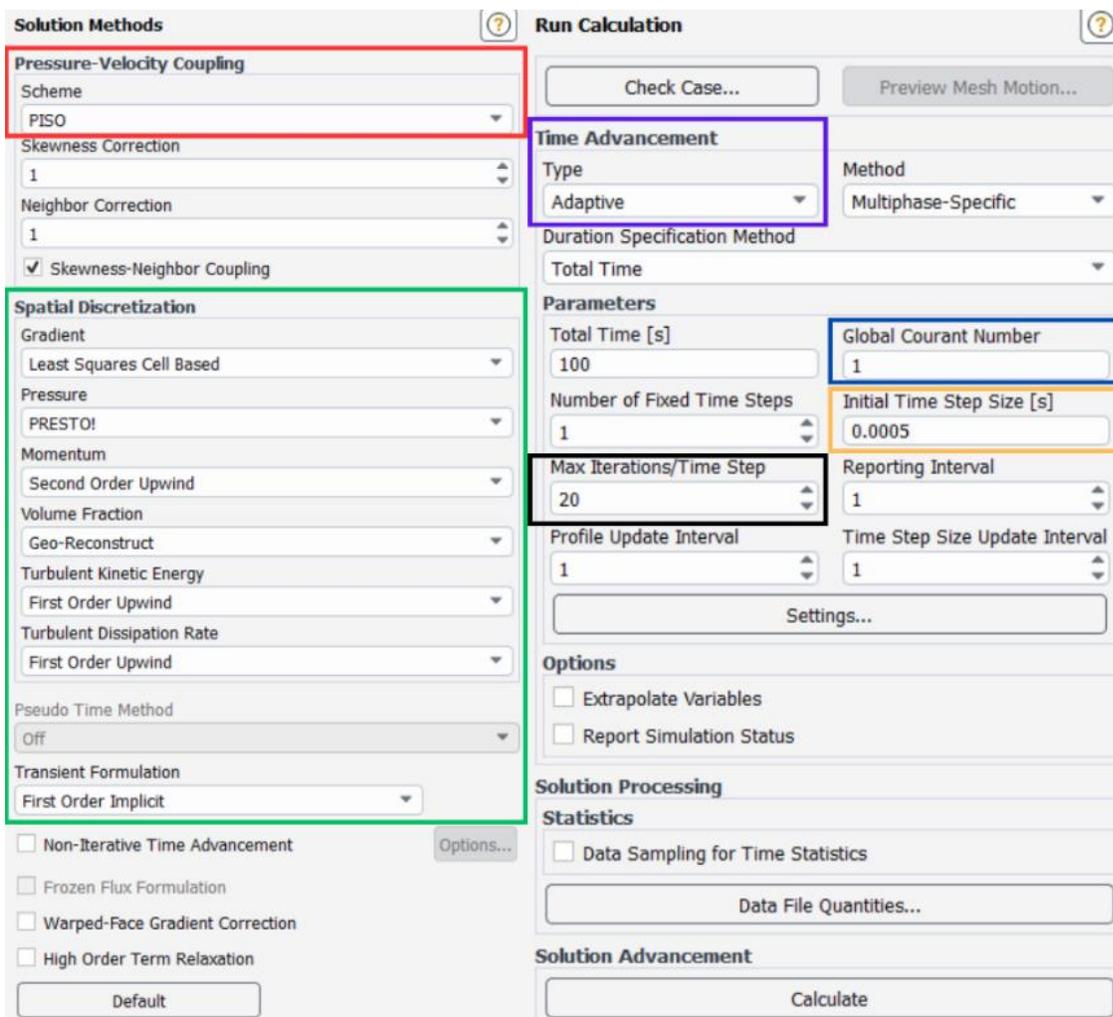
Nota. Las unidades son las usadas para cada ecuación de continuidad, en este caso kg/s. [En línea] Tomado de: How to Monitor Convergence using Residuals in Ansys Fluent — Lesson 3. Disponible: https://www.youtube.com/watch?v=dF0oYH_9pe0 [accedido: sep.15.2023]

Siendo que el *Absolute Criteria* por defecto tiene un valor de 0.001, eso quiere decir que que la simulación intentaba lograr que el balance tuviera un error de máximo 1 g/s [93]–[95]. El problema de esto es contexto, ya que todos los escenarios manejan de 95 a cientos de kg/s de fluido, tomando como base 100 kg/s, un error de 1 g/s sería del 0.001%, inversamente es como si se estuviese apuntando a una precisión de simulación del 99.999%; esto se consideró impráctico e ineficiente. Existen 2 formas de solucionar la problemática: aumentar el valor del *Absolute Criteria* o dejar de garantizar la convergencia de la continuidad; se encontró que el error mantenía una tendencia constante, sin importar las condiciones, y ese error siempre fue bajo (aproximadamente 0,1 kg/s en todo el sistema), por lo que se optó por la segunda opción. En el caso de los otros residuales, el valor del *Absolute Criteria* no está claro si es un porcentaje o si necesita multiplicarse por 100% para serlo, en cualquier caso, el valor por defecto pareció ser adecuado [93], [94], [96].

La literatura sugiere usar la opción extra *Global Scaling*, obtenida tras habilitar *Show Advanced Options*, para un mejor monitoreo. Por defecto el software usa *Local Scaling*, que reporta los errores en una zona particular, mientras que *Global Scaling* toma en cuenta todas las celdas [93]–[97].

Figura 49.

Interfaz de métodos de solución/Interfaz de parámetros de simulación.



Nota. El recuadro rojo define el sistema usado para el cálculo de las ecuaciones de presión y velocidad, verde muestra las opciones seleccionadas para el nivel de discretización de las ecuaciones, púrpura señala el tipo de consideración con el avance de tiempo, azul define el número de Courant usado, amarillo indica el *time step* inicial, negro especifica el máximo número de iteraciones por *time step*.

Existen 2 métodos primarios para resolver las ecuaciones de presión y velocidad: SIMPLE y Coupled. Lo que hace cada método es relativamente complejo, lo importante es que del método SIMPLE se desarrolló una mejora llamada PISO (*Pressure-Implicit with Splitting of Operators*), que fue creada con el propósito de manejar flujos multifásicos. Los valores de *Skewness Correction* y *Neighbor Correction* se dejaron intactos; *Skewness-Neighbor Coupling* fue activado para contrarrestar divergencia por posibles problemas derivados de dejar los valores anteriores por defecto [98]–[101]. Adicionalmente, el manual de Ansys indica que el uso de Coupled para multifase es recomendado cuando el mallado es de muy mala calidad o si los *time steps* a usar son muy grandes, ninguno de estos factores aplica por lo que se descarta esta opción [101].

La sección de Discretización Espacial (*Spatial Discretization*) define el nivel de precisión (y recursos) que se le va a dedicar al cálculo de la respectiva variable [102]. Todas estas opciones se dejaron por defecto por dos motivos: Mayor discretización requiere más recursos y la literatura sugiere que no necesariamente resulta en mejores resultados, sino que en algunos casos puede llegar a empeorarlos [75], [103]; no se cuenta con suficiente conocimiento para determinar cuáles variables valdría la pena aumentar su discretización, por lo que se decidió no modificar.

La opción *Adaptive* de *Time Advancement* permite que el *time step* se ajuste automáticamente para lograr el número de Courant digitado (1), de esta forma no hay que preocuparse por divergencia por un número de Courant demasiado alto tras no controlar bien el *time step* [104].

El número de Courant por defecto es 2, experimentación demostró que 2 era muy propenso a error de tipo *floating point*, que sucede cuando los residuales superan el valor máximo de error, por lo que se redujo a 1; la literatura indica que 1 es un buen número de Courant para un *solver* explícito [75]. Usar menos que 1 daría resultados más precisos, pero a costas de mayor demanda computacional, por lo que se decidió usar este valor.

Cada *time step* el simulador resuelve un set de ecuaciones y consigue resultados, esto es una iteración, si estos resultados no logran converger, el set de ecuaciones vuelve a calcularse, en la configuración actual este ciclo puede repetirse hasta 20 veces por *time*

step. Fuentes sugieren que una simulación que converja en 20 iteraciones o menos es señal de que está convergiendo correctamente [105], [106].

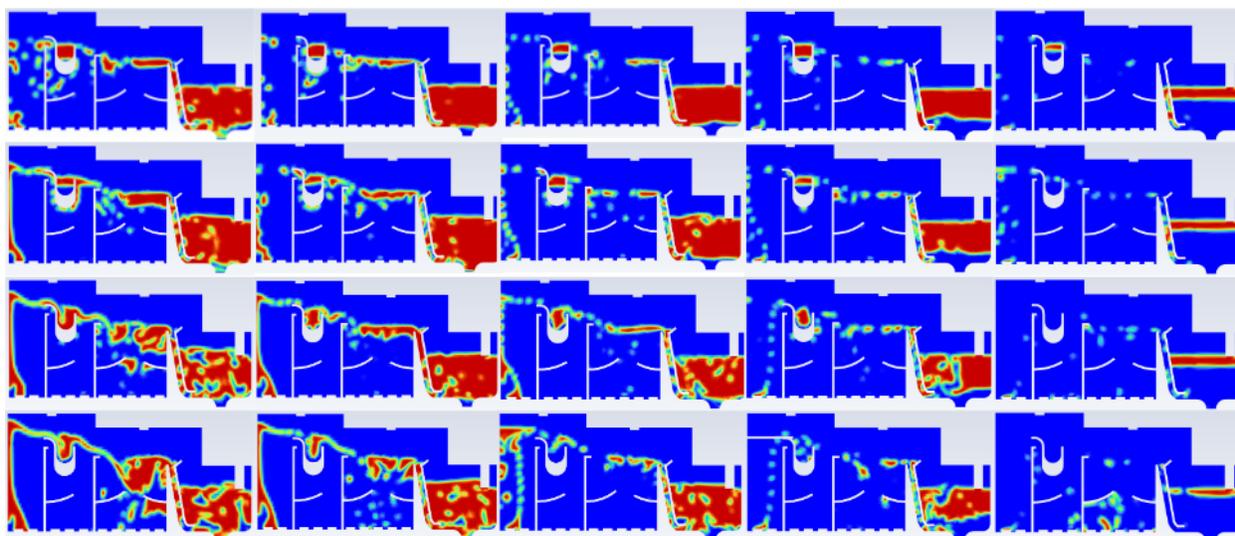
7.6. Análisis de resultados

En esta sección se analizarán los resultados de los 20 escenarios planteados.

7.6.1. Simulaciones

Figura 50.

Contours de todos los escenarios.



Nota. La primera fila son de la velocidad 0,5 m/s, la segunda de velocidad 1,0 m/s, la tercera de velocidad 1,5 m/s, la cuarta de velocidad 2,0 m/s. Adicionalmente, de izquierda a derecha, la primera columna es composición 30% oil, la segunda de 20% oil, la tercera de 10% oil, la cuarta de 5% oil y la quinta de 1% oil; ver Anexo 2.

La tabla de resultados puede examinarse con detenimiento en el anexo, las tablas a continuación fueron ajustadas para mostrar rápidamente la información relevante a graficar.

7.6.2. Resultados principales

Tras cada simulación se anotaron y procesaron los datos diligentemente, chequeando múltiples veces que fuesen lógicos y que no hubiera errores de digitación. Algunas

simulaciones tuvieron que rehacerse por error al digitar condiciones iniciales en el software, entonces se volvió una tarea rigurosa el confirmar los valores. Otras simulaciones presentaron problemas como números negativos (físicamente imposibles) o reportaban valores que no iban de acuerdo con lo visualizado durante la simulación, se tomaron medidas para extraer valores lógicos. A continuación, en la tabla 3 se listan los resultados principales de todos los escenarios planteados.

Tabla 3.*Resultados de división RESULTADOS.*

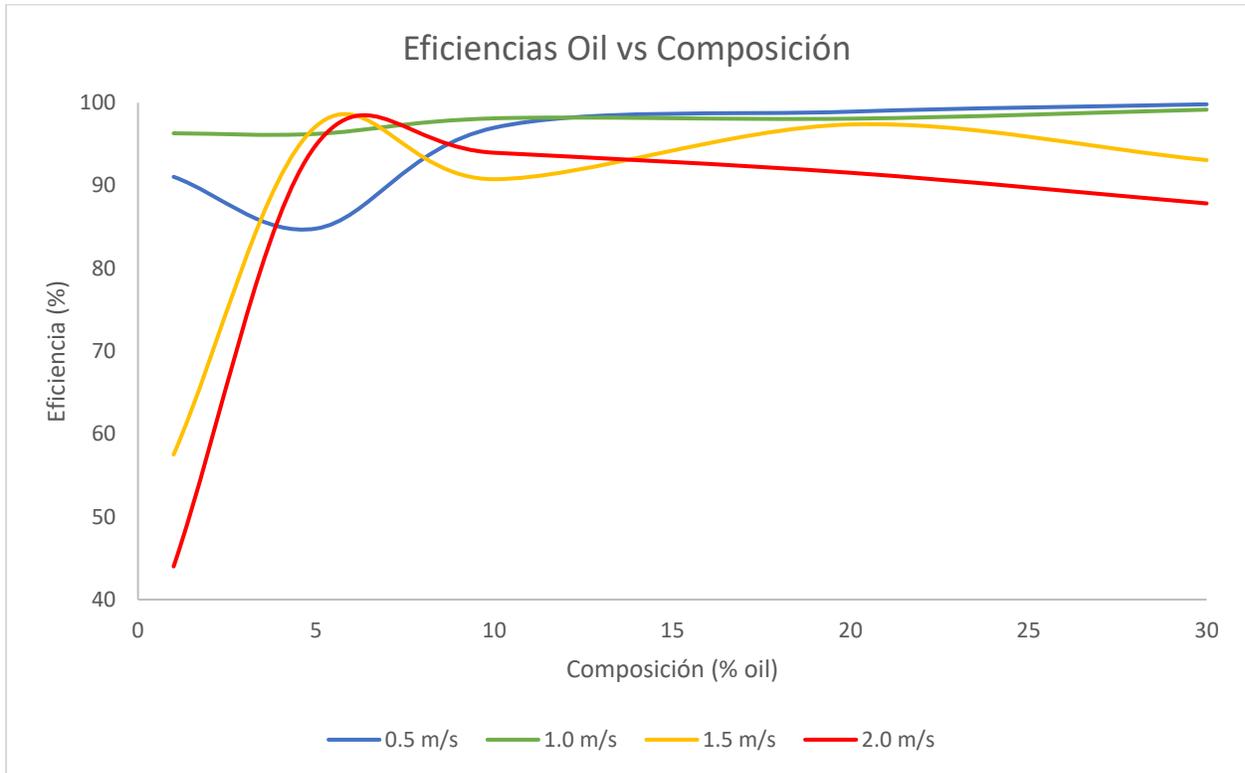
Escenarios	Velocidad (m/s)	% Oil	Eficiencia Oil (%)	Potencial Diario (Barriles)	Oil/Water Ratio (-)	Eficiencia Water (%)
1	0,5	30	99,814	11050	6,80	96,55
2	0,5	20	98,919	10768	14,18	99,93
3	0,5	10	96,986	8399	7,15	99,95
4	0,5	5	84,805	5077	2,09	100,00
5	0,5	1	91,056	460	0,36	100,00
6	1,0	30	99,167	13047	12,46	98,93
7	1,0	20	98,073	12590	22,39	99,50
8	1,0	10	98,114	10212	6,97	99,86
9	1,0	5	96,236	6792	2,30	99,97
10	1,0	1	96,311	834	0,26	100,00
11	1,5	30	93,069	25116	3,02	94,88
12	1,5	20	97,377	21898	11,64	99,72
13	1,5	10	90,765	11882	3,88	98,39
14	1,5	5	97,169	7075	1,78	99,55
15	1,5	1	57,516	1384	0,28	100,00
16	2,0	30	87,842	30694	4,10	96,66
17	2,0	20	91,544	27249	6,76	98,35
18	2,0	10	93,959	15362	4,18	98,58
19	2,0	5	94,909	8771	1,34	99,51
20	2,0	1	44,003	1010	0,13	100,00

Nota. Las columnas están clasificadas con colores haciendo referencia a la tabla explicada en el capítulo anterior.

Con la información de la tabla 3 se establecen 4 gráficas para: Eficiencia Oil, Potencial Diario, Oil/Water Ratio y Eficiencia Water.

Figura 51.

Gráfica de eficiencias oil vs composición.



Nota. De todas las velocidades, la única que es consistente en cuanto a la separación sin importar la composición es la de 1,0 m/s, sin embargo, no es necesariamente la mejor opción en todos los casos. Es un problema de equilibrio de opciones y con sólo esta gráfica es difícil definir con precisión cuál debería ser la velocidad usada en cada composición para garantizar máxima separación.

En composición de 1%, las únicas opciones válidas son 0,5 m/s y 1,0 m/s, no se define como absoluto elegir una o la otra de momento porque hay más información relevante que no se presenta en esta gráfica.

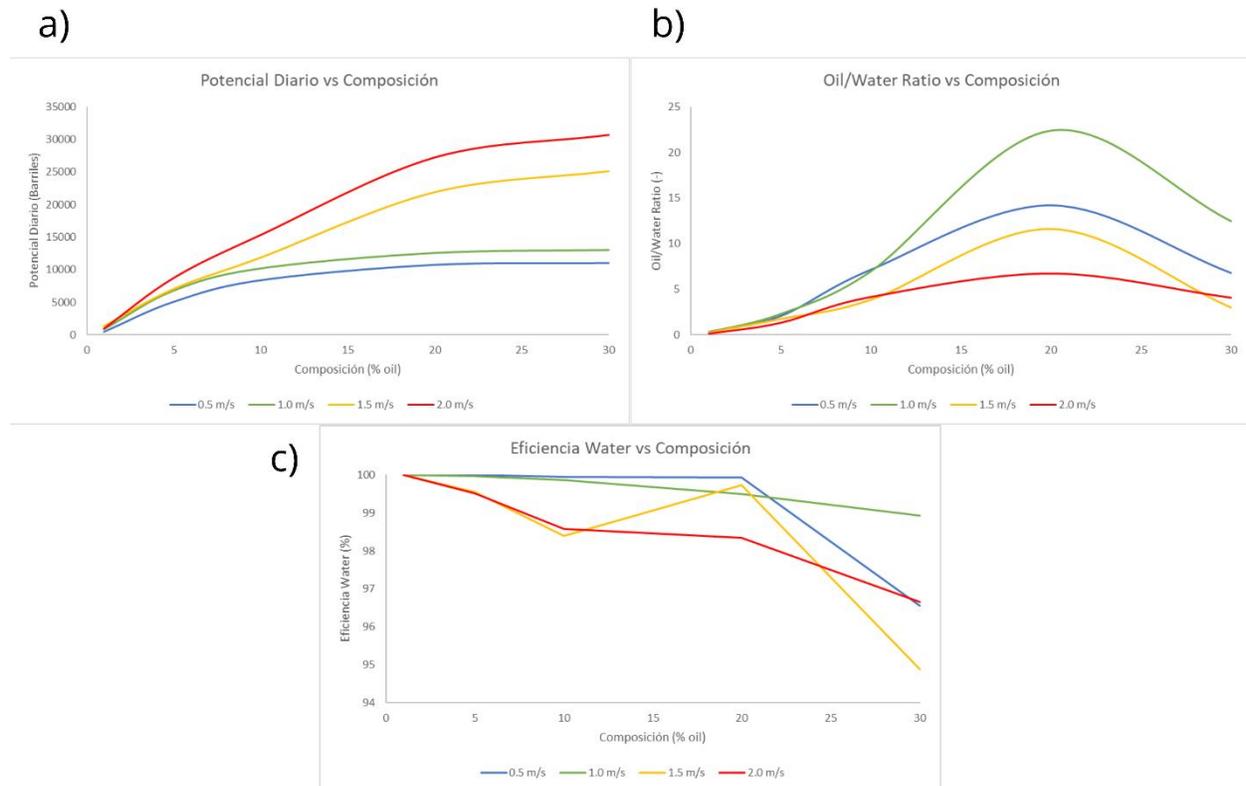
En composición de 5%, la velocidad de 0,5 m/s tiene un comportamiento extraño, pues al principio la tendencia indica que menor composición debería ser menor eficiencia, pero en 1% se muestra que no es el caso; por cuestión de tiempo no se hizo otra simulación, pero se estima que el resultado verdadero debería ser un poco más alto, como mínimo

a la altura de 1%, aunque es posible que efectos desconocidos del diseño sí suceden en esta composición. La mejor opción según esta gráfica es 1,5 m/s por un pequeño margen.

Aproximadamente entre 6% y 7% la transición sugiere que 2,0 m/s sería una mejor opción, sin embargo, no se tiene datos experimentales a estos porcentajes, por lo que no es definitivo. En composiciones de 10% para arriba, la mejor eficiencia se le otorga a la velocidad de 0,5 m/s, pero la de 1,0 m/s sólo es ligeramente menor; en composición de 20%, la de 1,5 m/s es también sólo ligeramente menor. Finalmente, en 30%, las mejores opciones son 0,5 m/s o 1,0 m/s, adicionalmente, 1,5 m/s podría ser viable si otras métricas lo sugieran, a 2,0 m/s el flujo es excesivamente turbulento entonces no es recomendable.

Figura 52.

Gráficas de resultados primarios.



Nota. (a) el comportamiento es bastante lógico, mayores velocidades indica mayor cantidad de aceite siendo procesado, por ende, aumentando el potencial diario; (b) mientras más alto sea este valor, mejor se puede considerar la separación, ya que indica que en la última sección del separador hay más aceite que agua; (c) la razón por la que a 1% de composición todas las velocidades tienen una eficiencia *water* del 100% es una asunción teórica. Ver Anexo 2.

Es interesante el gran salto que hay entre 1,0 m/s y 1,5 m/s en la primera gráfica, el motivo de esto está ligado con el tiempo de llenado, pues a partir de 20% se vuelve la mitad entre esas velocidades (60 segundos a 33 segundos). El potencial diario tiene una gran importancia para la propuesta, pues este número permite definir el rango de trabajo en el que el barco podrá trabajar. Recordando que hay 4 separadores, el valor que se extraiga a una velocidad y composición en un día dado, se debe multiplicar por 4 para calcular el promedio de barriles a conseguir ese día. Por ejemplo, a 20% de composición y 1,5 m/s de velocidad, sería posible recolectar un máximo teórico de casi 22.000 barriles por cada separador, consiguiendo hasta 88.000 barriles ese día; poniendo

adicionalmente como ejemplo un derrame de 100.000 barriles, que con los métodos actuales tomaría días y semanas en recolectar, provocando daños irreparables en el ecosistema, este escenario podría recogerlo en menos de 2 días de operación.

Aunque se comprueba con los resultados que menores porcentajes de la segunda gráfica no significa que haya mala separación, sí presenta un problema, y es la posibilidad de que agua se escape por el *outlet_oil* en un tiempo de funcionamiento mayor. A 20% de composición se distingue un máximo para todas las velocidades. La distribución pareciera tener comportamiento de campana, donde a izquierda y derecha del auge, se tiene un declive simétrico. No está claro por qué se exhibe este comportamiento, sin embargo, la información sugiere que la composición óptima de operación debería ser ésta, y preferiblemente, a una velocidad de 1,0 m/s para obtener la mejor separación.

En cuanto a la tercera gráfica, partiendo de que después del separador inicia el sistema de coagulación/floculación que en principio debería ser capaz de remover “todo” el residuo restante, únicamente se toma como “perdido” el porcentaje que casi inevitablemente termine succionado por la salida *outlet_oil*, y para estos escenarios la eficiencia de decantación se tomó como del 100%, entonces no debería suceder que agua salga por ahí. Por regla general, cuando se tiene 30% de composición, la última sección del separador se muestra muy turbulenta durante las simulaciones, el efecto puede verse en la Figura 50, pero igual mantienen una eficiencia bastante alta. Cabe agregar que en 30% de composición los tiempos de llenado fueron menores a 1 minuto en todos los escenarios, por lo que es difícil definir si lograrse una mejor decantación si se hubiese dejado por más tiempo prendido. La velocidad 1,0 m/s muestra el mejor resultado a esta composición, la simulación mostró un comportamiento similar a 0,5 m/s con la excepción de que mucha menos agua pasaba de la sección 3 a la 4, mientras que a partir de 1,5 m/s, el problema parecía ser que la cantidad de aceite se empieza a descontrolar, entonces burbujas de agua son arrastradas junto con el aceite que pasa de una sección a otra, aumentando la cantidad de agua en la última sección; en 0,5 m/s, no había suficiente aceite pasando de sección, por lo que ocasionalmente agua pasaba, y por la gran concentración de aceite ya existente, le costaba asentarse, o eso se cree.

La tabla 4, promedia los resultados de las velocidades en todas las composiciones.

Tabla 4.

Eficiencias, potencial diario (barriles) y oil/water ratio promedios.

Velocidad (m/s)	Eficiencia Oil (%)	Potencial Diario (Barriles)	Oil/Water Ratio	Eficiencia Water (%)
0,5	94,316	7150,732	6,114	99,285
1,0	97,580	8694,947	8,877	99,650
1,5	87,179	13471,021	4,121	98,508
2,0	82,451	16617,224	3,302	98,620

Nota. El promedio se hace sumando los valores de cada composición y dividiéndolos en la cantidad de composiciones (5); las columnas están clasificadas con colores haciendo referencia a la tabla explicada en el capítulo anterior.

Esta tabla es usada para definir las condiciones básicas de operación del proceso, eligiendo el valor de 1,0 m/s por ser el mejor en todos los promedios. Este valor tiene gran importancia en el proyecto, pues no era posible hacer el balance de masa del diagrama PFD o diseñar las tuberías del P&ID sin este. Cabe aclarar que a pesar de que se elija esta condición como base de cálculo de los demás resultados, no se están excluyendo las otras velocidades, simplemente por tema de practicidad se está eligiendo una.

7.6.3. Resultados adicionales

Los resultados de la tabla 5 son relevantes para considerar futuros rediseños del separador.

Tabla 5.*Resultados de división POST SIM.*

Escenarios	Velocidad (m/s)	% Oil	Tiempo de llenado (s)	NRZ 1 (% perdido)	NRZ 2 (% perdido)
1	0,5	30	63,06	0,186	0,000
2	0,5	20	67,09	1,081	0,000
3	0,5	10	79,18	3,014	0,000
4	0,5	5	103,36	15,195	0,000
5	0,5	1	485,00	8,944	0,000
6	1,0	30	59,03	0,627	0,205
7	1,0	20	61,05	1,451	0,475
8	1,0	10	67,09	0,339	1,547
9	1,0	5	79,18	1,154	2,610
10	1,0	1	215,00	0,000	3,689
11	1,5	30	25,00	0,473	6,458
12	1,5	20	33,00	0,021	2,602
13	1,5	10	51,00	0,000	9,235
14	1,5	5	72,49	0,000	2,831
15	1,5	1	135,00	28,619	13,864
16	2,0	30	20,50	0,030	12,128
17	2,0	20	27,00	0,000	8,456
18	2,0	10	43,00	0,000	6,041
19	2,0	5	52,00	0,000	5,091
20	2,0	1	95,00	42,856	13,141

Nota. Las columnas están clasificadas con colores haciendo referencia a la tabla explicada en el capítulo anterior.

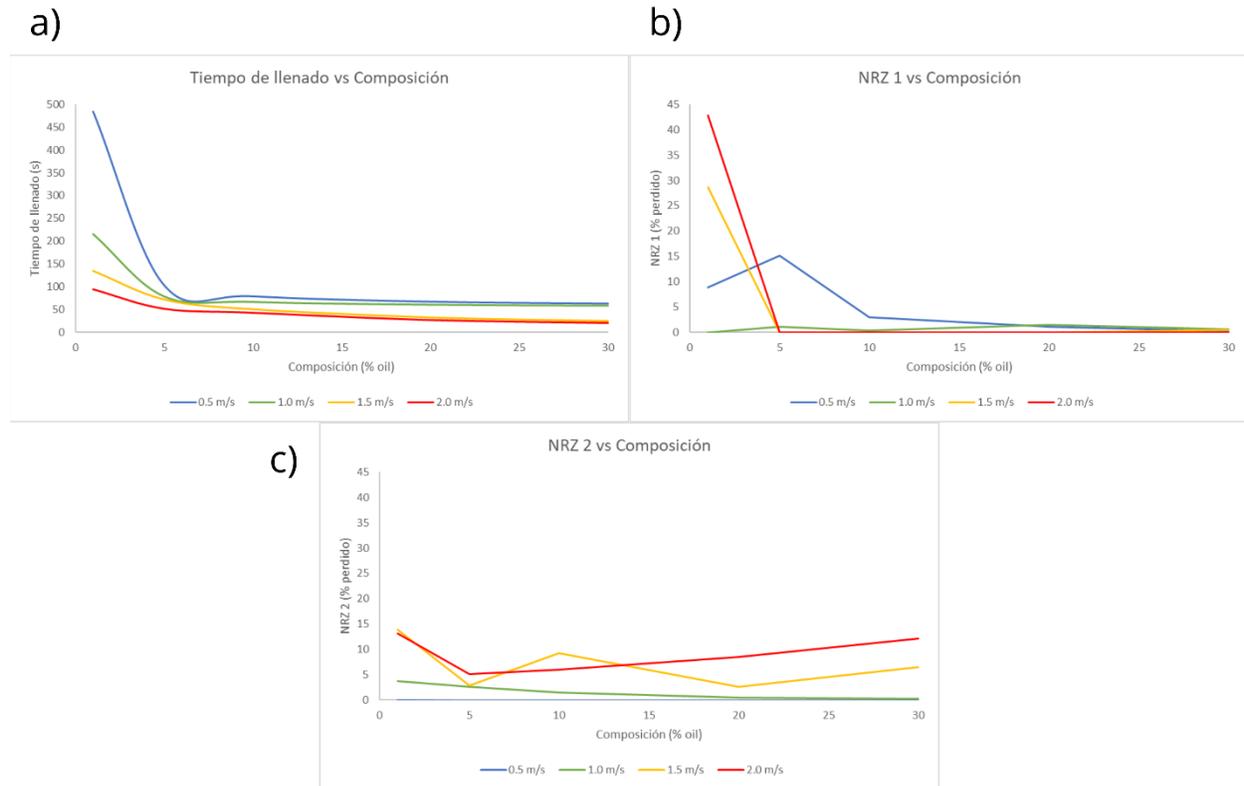
Con la información de la tabla 5 se establecen 3 gráficas para: Tiempo de llenado, NRZ 1 y NRZ 2.

El motivo de los tiempos de llenado similares en la programación de los outlets MFO_1 y MFO_2, pues como mencionado antes, en el primero sale el 50% del agua entrante, y

en el segundo el 45%. En teoría, en ambos casos debe estar pasando el 5% del agua, pero las simulaciones demostraron que, en los escenarios de menor velocidad, la cantidad de fluido llenando la sección 3 no ocurría suficientemente rápido como para poder pasar un constante 5% a la sección 4, sino que se acumulaba el aceite por un tiempo hasta que eventualmente se rebalsaba, permitiendo una mejor separación; este comportamiento ocurría parcialmente para las mayores velocidades. Para las composiciones de 1% sucede una exageración de lo explicado anteriormente, ya que toma mucho más tiempo en que se rebalse la sección 3, incluso pareciera que fuese exponencial la duración, aumentar la velocidad por encima de 2,0 m/s no debería mejora mucho el tiempo, e inversamente, disminuir la velocidad por debajo de 0,5 m/s, debería aumentar considerablemente el tiempo de llenado. Sería conveniente experimentar con otros porcentajes de outlet para esos MFOs.

Figura 53.

Gráficas de resultados secundarios.



Nota. (a) en general los tiempos de llenado son muy similares entre 0,5 m/s y 1,0 m/s, y entre 1,5 m/s y 2,0 m/s; (b) a 1,0 m/s la pérdida es esencialmente nula a todas las composiciones; (c) la velocidad de 0,5 m/s es la que menos pérdidas sufre, siendo el valor prácticamente nulo en todas las composiciones. Ver Anexo 2.

Según la segunda gráfica, la sección 2 del separador quedó naturalmente optimizada para velocidad de 1,0 m/s. Para composiciones por debajo del 5% se consiguen grandes pérdidas de la velocidad 0,5 m/s, se notó mediante la simulación que a pesar de que esta velocidad es baja, la cantidad de aceite presente es tan diminuta que una buena parte es arrastrada por la corriente de agua hacia el outlet MFO_1; el mismo efecto sucede para las dos velocidades más altas en composición de 1%. En general, en composiciones por encima de 10%, la pérdida en esta sección es mínima y nula en algunos escenarios.

En la sección 3 del separador, considerando el análisis anterior, los valores a 0,5 m/s pueden considerarse *outliers*, por lo que puede ser ignorado el resultado en la tercera

gráfica. Entre las dos velocidades mayores se tiene una tendencia a pérdida relativamente constante entre 5% y 10% a toda composición, el porcentaje no incita un rediseño urgente, pero es una pérdida considerable, por lo que se recomienda evaluar la altura y/o curvatura de las “rampas”, así como del espacio en el centro, pues según Bernoulli, cuando un fluido pasa de un mayor a un menor diámetro, el flujo másico se mantiene constante, y para lograr esto aumenta su velocidad [107], por lo que es posible que esta porción sea permanentemente arrastrada al MFO_2. A la velocidad de 1,0 m/s el comportamiento es diferente en sentido de que disminuye con el aumento de la composición, la razón es lo que sucede en NRZ 1, con menor composición y relativamente baja velocidad, la cantidad de aceite es mucho menor a la de agua, por lo que es propensa a ser arrastrada por la corriente.

8. DISEÑO DE PLANTA

8.1. Diagrama P&ID

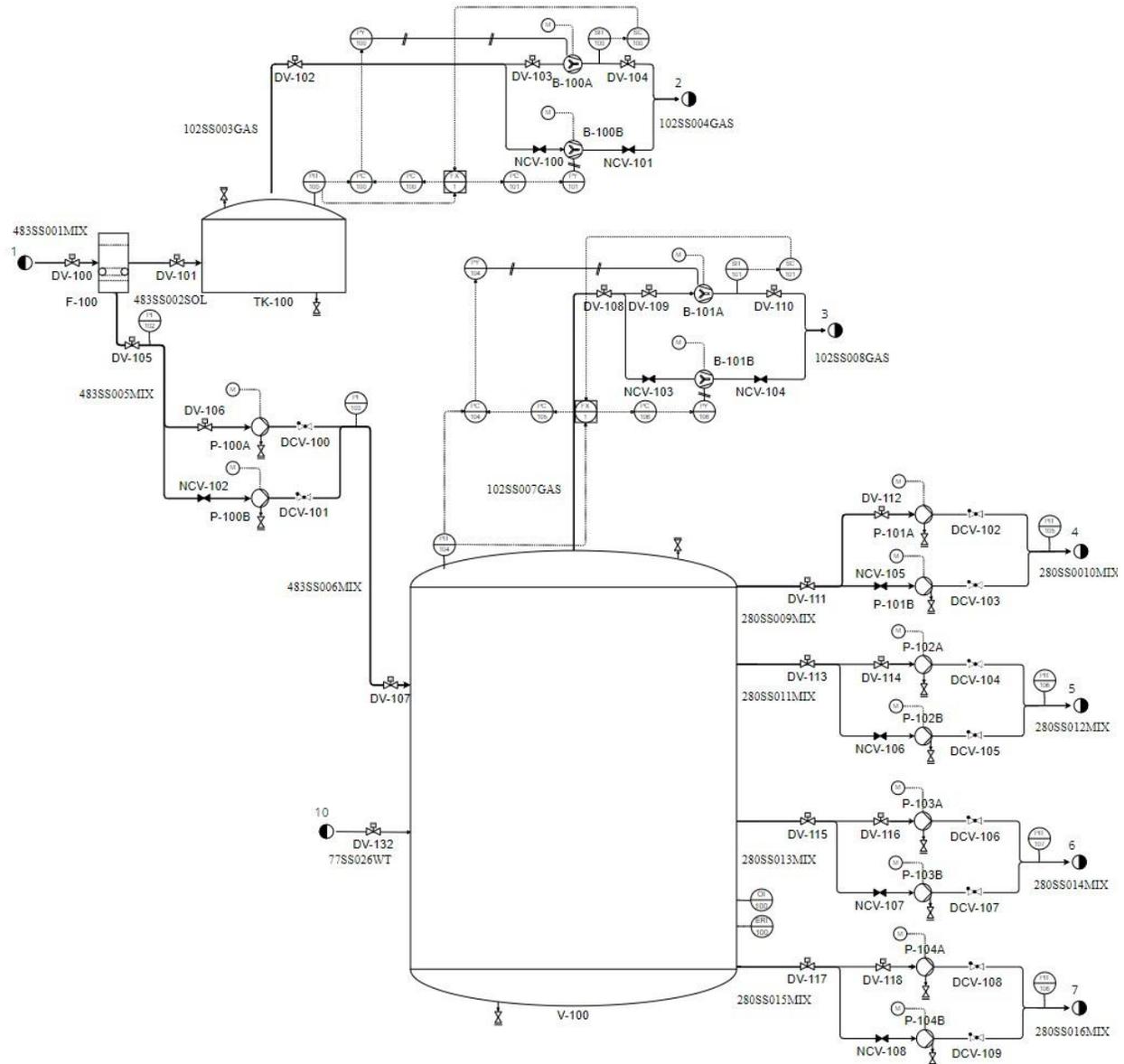
Este capítulo es la culminación del trabajo, en dónde teniendo el 100% de las piezas es posible cerrar todos los detalles. Para no confundir, se aclaran las diferencias entre diagramas PFD y P&ID:

- Enfoque mayor en instrumentación, mostrando con detalle indicadores, transmisores, controladores, relés, funciones lógicas, alarmas, etc.
- Presencia de todos los equipos auxiliares (bombas, ventiladores, válvulas, etc).
- Todas las tuberías se diferencian en grosor (en donde la línea más gruesa es literalmente de mayor diámetro) [108].
- No hay corrientes, sino que las tuberías tienen enumeración y nombramiento según la siguiente nomenclatura: 102SS001OIL, donde 102 es el diámetro de la tubería en mm, SS es el material (*Stainless Steel*), 001 es la numeración, y las últimas letras hacen referencia a la composición primaria del flujo (en este caso aceite) [108].
- Las líneas sólidas son tuberías, las líneas punteadas son conexiones eléctricas, las líneas sólidas con raya diagonal doble son conexiones neumáticas.
- En teoría el tamaño de los equipos debería ser comparable, entonces si una bomba es de 1 cm de tamaño, y un tanque es de 10 cm, el tanque es físicamente 10 veces más grande que la bomba [108]; sin embargo, esta regla no se llevó a cabo a detalle, sino que los tamaños son muy relativos.
- Todos los equipos (menos válvulas) tienen su respectivo *vent* y/o desagüe, según sugerencia de la literatura [108].
- Accesorios nuevos: DV (Digital Valve, Válvula Digital), DCV (Digital Check Valve, Válvula Check Digital), NCV (Normally Closed Valve, Válvula Normalmente Cerrada), DLV (Digital Level Valve, Válvula de Nivel Digital), DWV (Digital Weight Valve, Válvula de Peso Digital). Para aclarar, a excepción de la válvula check, todas las válvulas son el mismo tipo, pero con distintos nombres para diferenciar su función en el proceso.

En las siguientes figuras se muestra el diagrama de tuberías e instrumentación (P&ID) del proceso dividido en varias partes para poder explicar los detalles relevantes por separado.

Figura 54.

Diagrama de tuberías e instrumentación – sección de recolección.



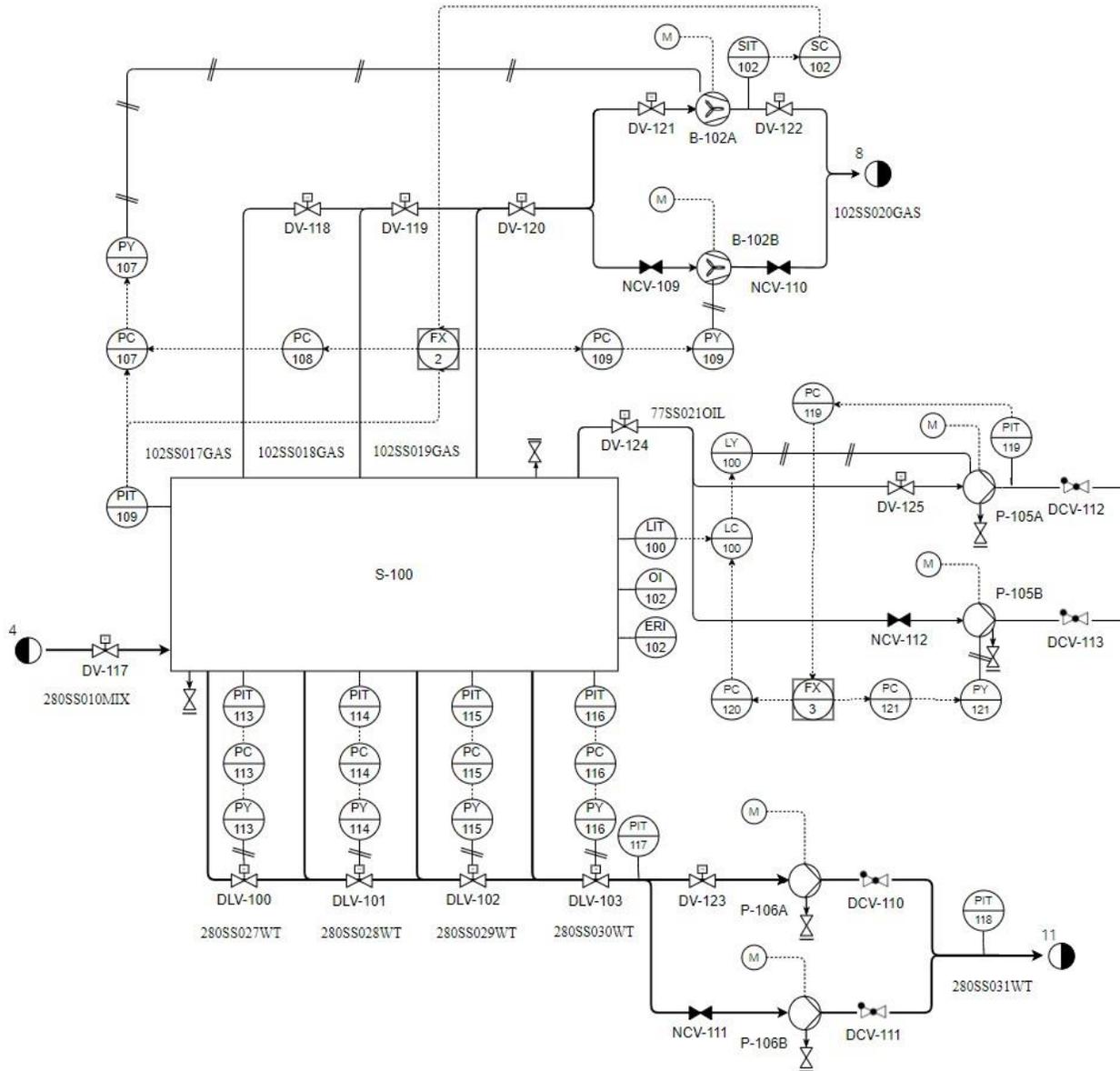
Nota. Dibujado por Pedro Solórzano Rivero, sistema utilizado: ISO 10628. Ver Anexo 3.

Se puede visualizar que, rodeando cada equipo principal, bombas y ventiladores, hay válvulas, esto se hace siguiendo las sugerencias de la literatura pues son necesarias para control y mantenimiento [108].

En las salidas a la derecha del tanque V-100 estás posicionadas 4 tuberías a distintas alturas, se quiere aclarar que esto sólo se ve así porque el dibujo es 2D, si fuese 3D, todas las salidas estarían horizontales a la misma altura (posiblemente un 50-70% de la altura del tanque).

Figura 55.

Diagrama de tuberías e instrumentación – sección de separación.

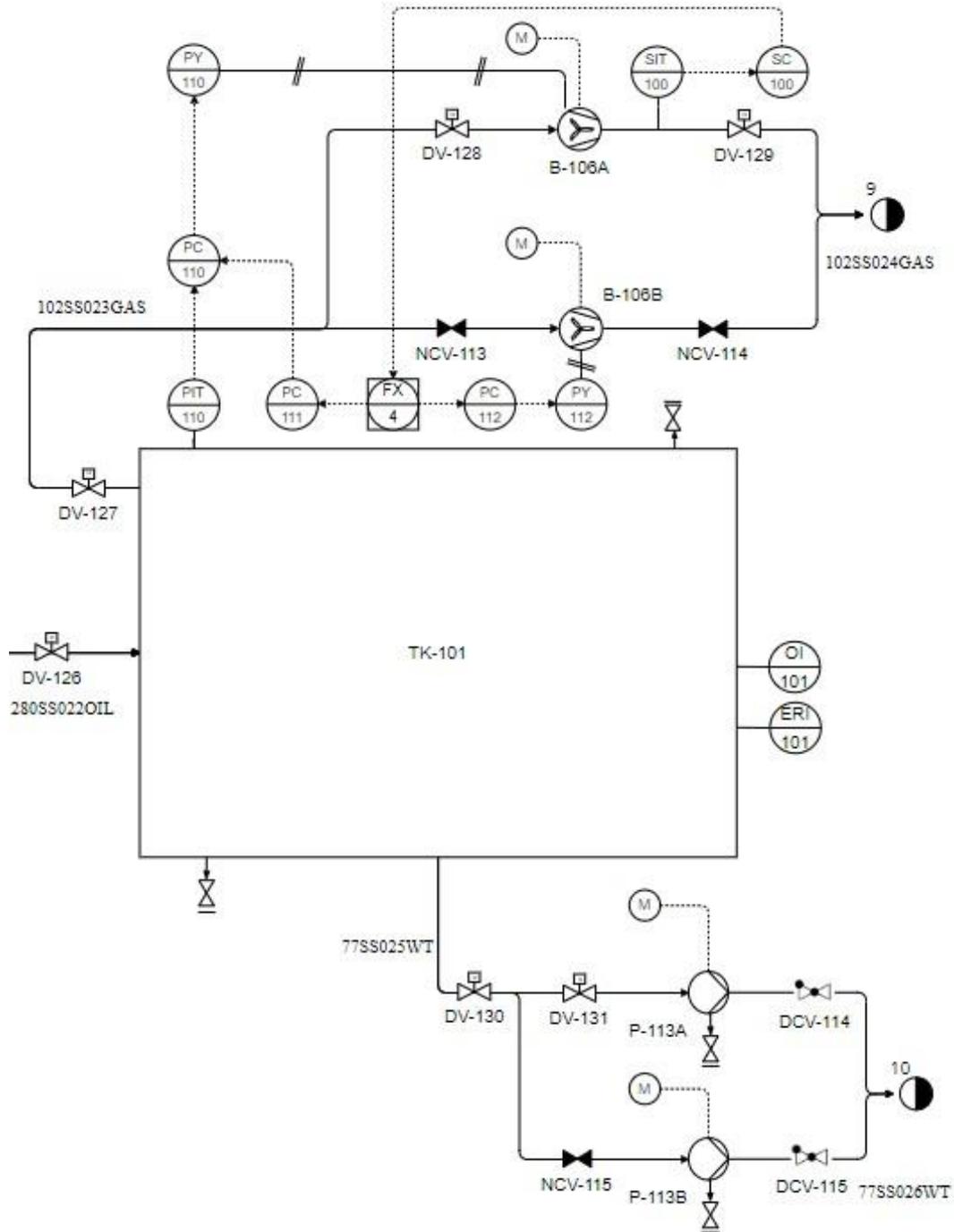


Nota. Dibujado por Pedro Solórzano Rivero, sistema utilizado: ISO 10628. Ver Anexo 3.

Este diagrama esencialmente no se diferencia del PFD de la Figura 26, con la excepción de la adición de los equipos auxiliares respectivos y los lazos de control detallados.

Figura 56.

Diagrama de tuberías e instrumentación – tanque de almacenamiento.

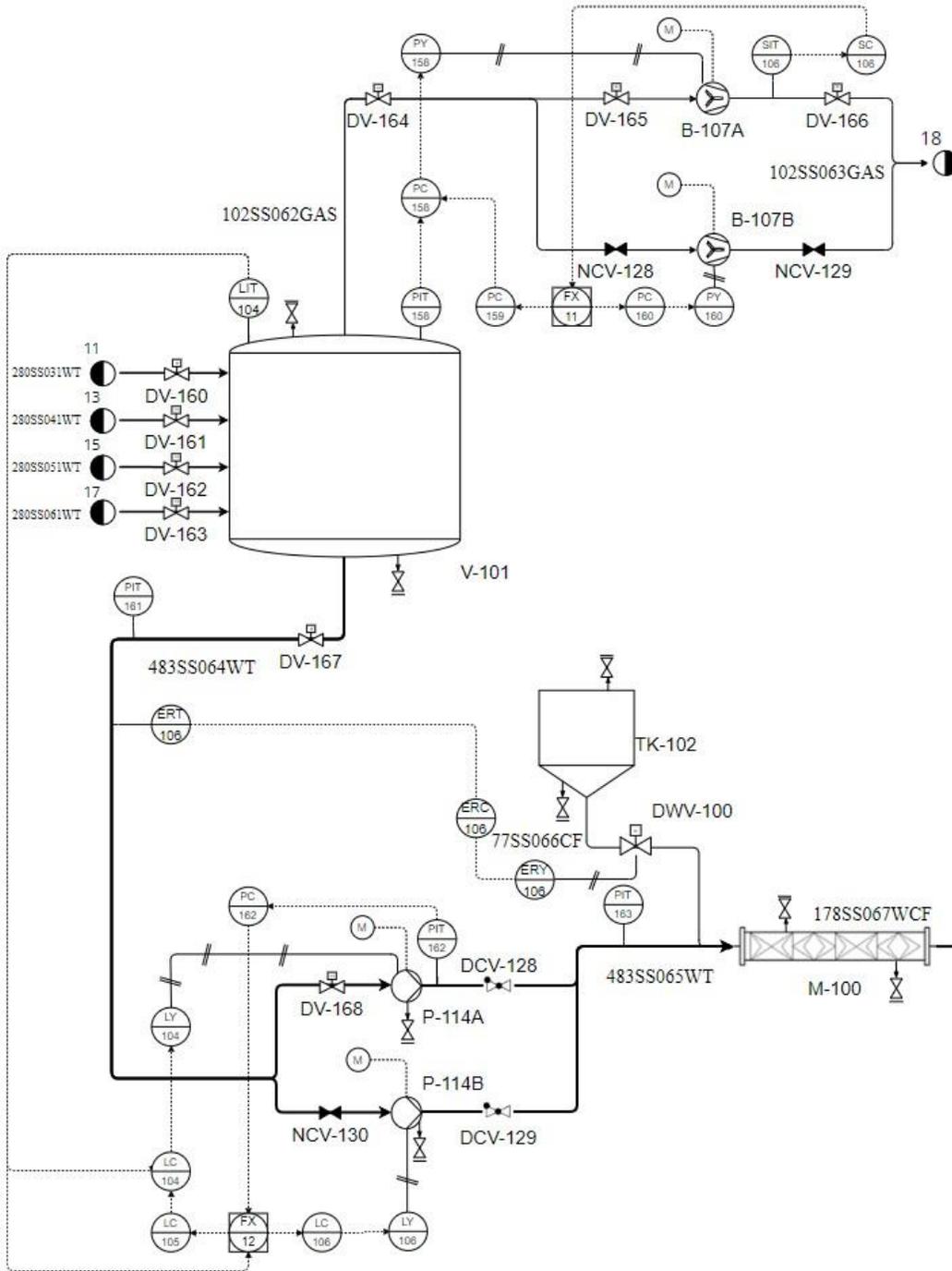


Nota. Dibujado por Pedro Solórzano Rivero, sistema utilizado: ISO 10628. Ver Anexo 3.

A diferencia del PFD, Figura 27, la entrada a este tanque se muestra como una sola tubería, se quiere recalcar que no es particularmente relevante cuántas tuberías se conecten al tanque.

Figura 57.

Diagrama de tuberías e instrumentación – sección de limpieza (parte 1).

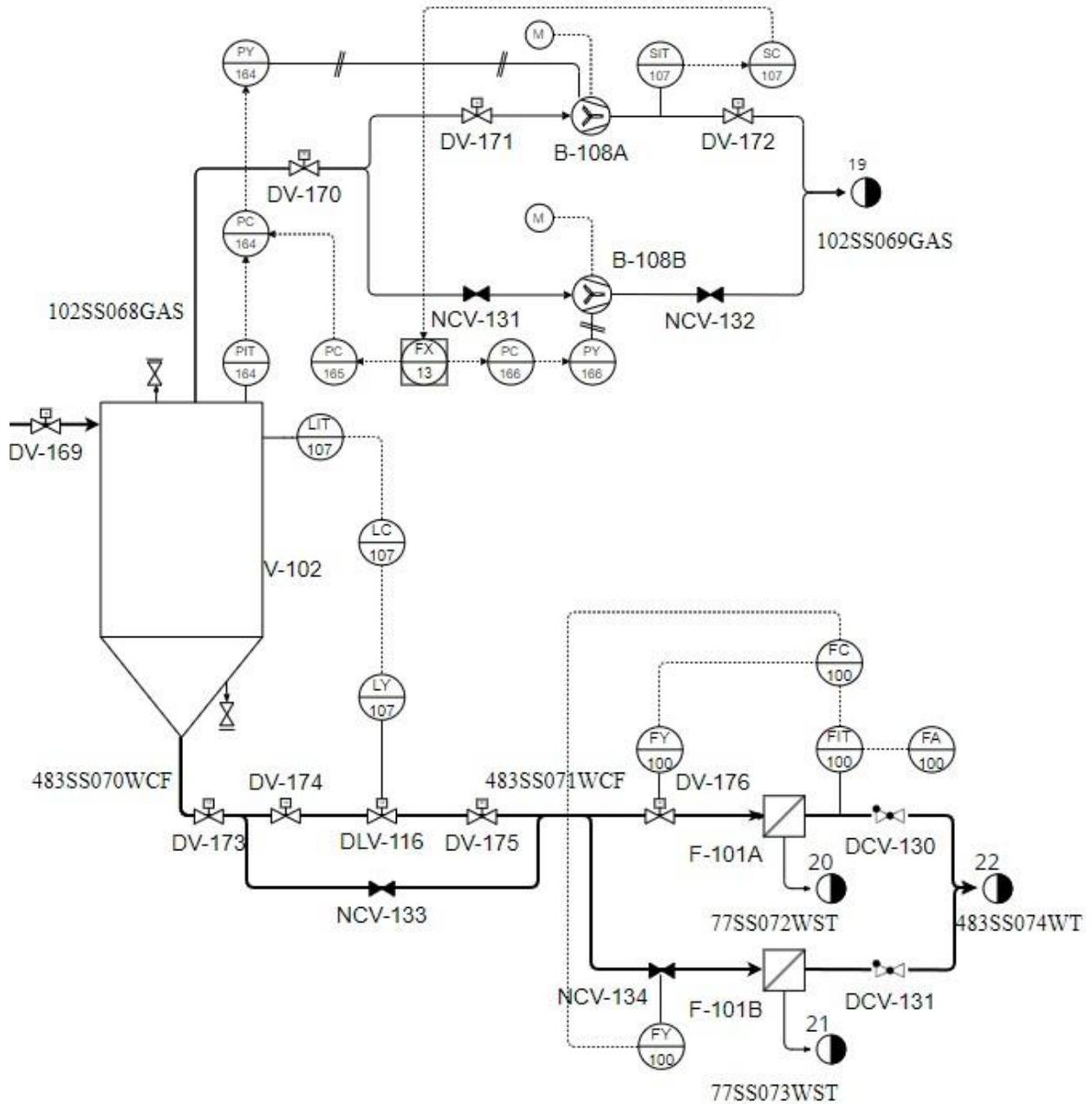


Nota. Dibujado por Pedro Solórzano Rivero, sistema utilizado: ISO 10628. Ver Anexo 3.

Esta última sección se muestra en las Figuras 57 y 58. En la salida de V-101 se muestra una única tubería, pero esto no es necesariamente la única solución; en cuestión de diagrama se volvía mucho más complejo (innecesariamente) al partir esa tubería en 4, por lo que se decidió usar una. El mezclador se ve con un *vent* y un desagüe, recordando que este “equipo” es una tubería de decenas de metros de largo a modo serpentín, es casi implícito que necesite más de un conjunto.

Figura 58.

Diagrama de tuberías e instrumentación – sección de limpieza (parte 2).



Nota. Dibujado por Pedro Solórzano Rivero, sistema utilizado: ISO 10628. Ver Anexo 3.

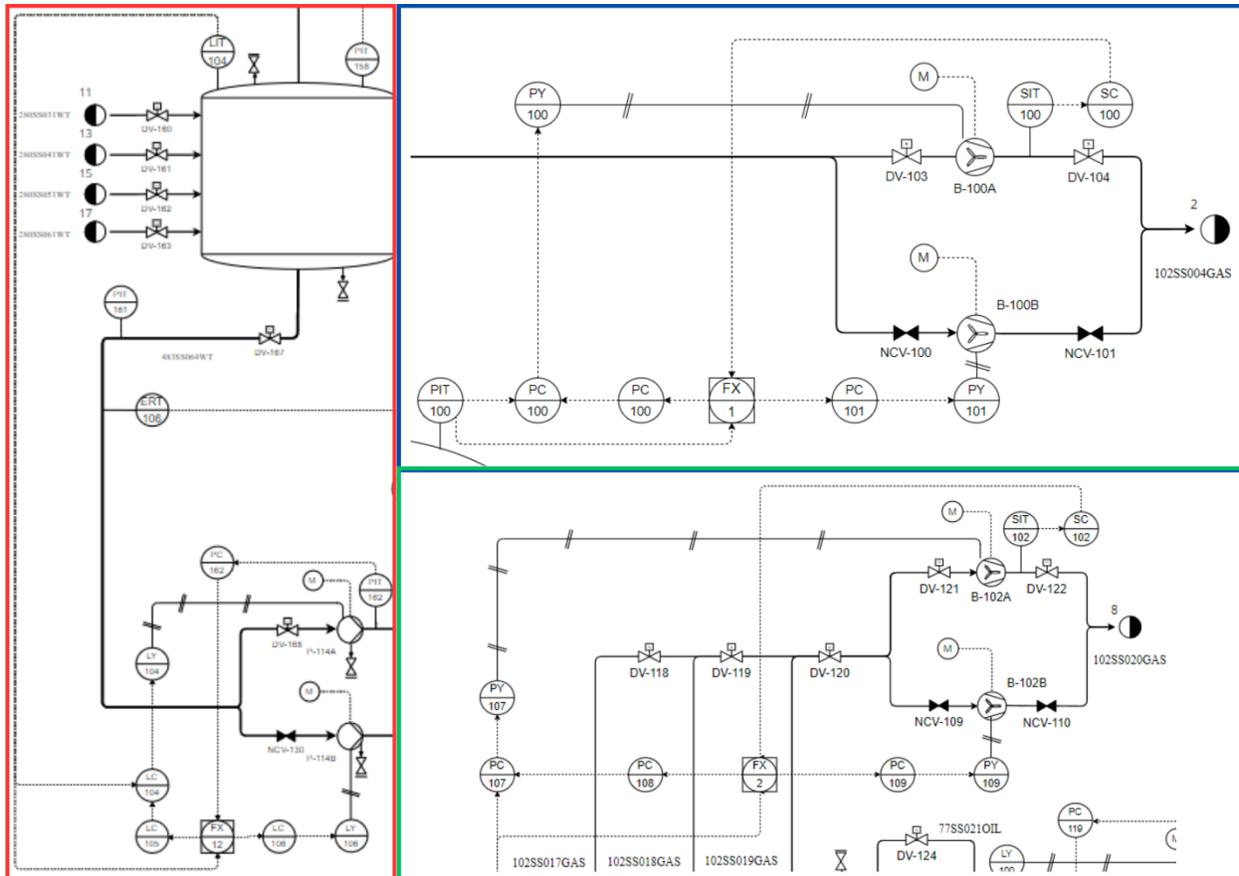
El tamaño del equipo V-102 está considerablemente impreciso, pero por conveniencia de dibujo se dejó así. Al final se muestra la bifurcación de filtros mencionada en el capítulo 5.

8.2. Lazos de control

Esta sección se escribe para explicar la instrumentación usada en varias partes del diagrama, pues no es convencional, sino una propuesta. Resulta que la literatura no explicaba precisamente cómo describir el control en un sistema completamente automático donde si un equipo se avería con la planta activa, este se apaga y el de repuesto se prende y es controlado de la misma forma que el otro; algunos de estos controles se visualizan en la Figura 59.

Figura 59.

Lazos de control propuestos para un sistema automático.



Nota. Los bordes de colores son para reconocer diferentes estructuras; el rojo está en la Figura 57, el azul en la Figura 54, y el verde en la Figura 55.

A continuación, en la Figura 60 se representa un esquema con explicación de cómo funciona el circuito.

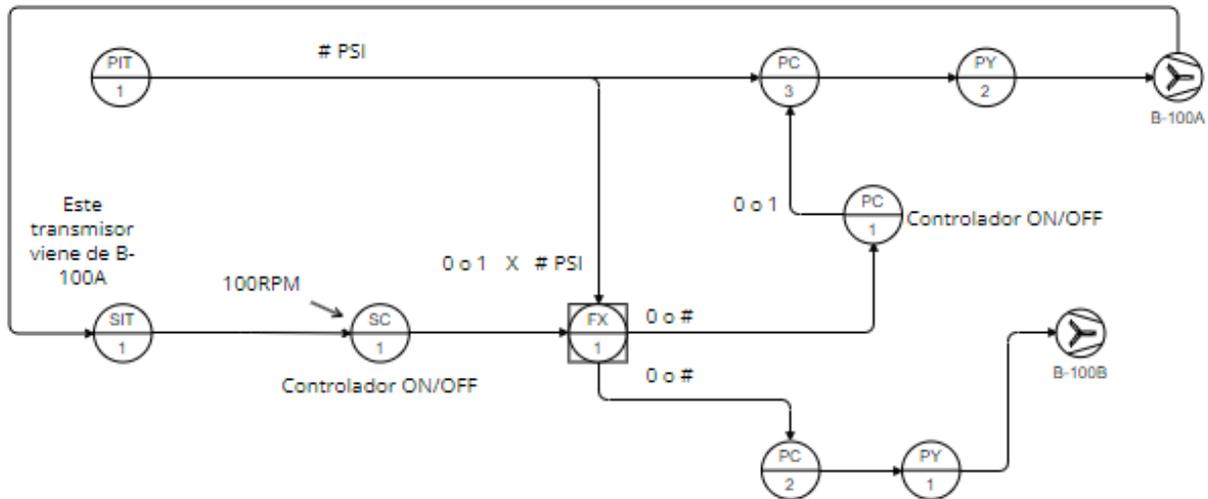
Se describe la función de cada instrumento:

- Transmisor e Indicador de RPM SIT-1: Indica en sala de control y transmite la información de RPM del ventilador B-100A.
- Transmisor e Indicador de Presión PIT-1: Indica en sala de control y transmite la información de PSI del equipo respectivo (tanques, separadores, etc.).

- Controlador SC-1: Es un controlador de tipo ON/OFF, entonces tras recibir la señal de RPM, la compara con un número programado, si es menor a 100RPM devuelve 0, si es mayor devuelve 1.
- Función FX-1: Recibe información de PIT-1 y el valor recibido lo multiplica por el valor de SC-1 (0 o 1).
- Controlador PC-1: Es un controlador de tipo ON/OFF, si recibe un valor de 0 quiere decir que B-100A está funcional, entonces devuelve un 1, si recibe un valor positivo, indica que a B-100A le sucedió algo y hay que apagarlo, entonces devuelve un 0.
- Controlador PC-2: Está constantemente recibiendo señal, sin embargo, siempre que B-100A esté funcional, la señal que recibirá es 0, por lo que mantendrá el ventilador B-100B permanentemente apagado. En la situación en la que B-100A se dañe, FX-1 le transmitirá la señal de PSI, que usará para controlar los RPM del ventilador B-100B.
- Controlador PC-3: Normalmente está recibiendo información de PIT-1 para controlar al ventilador B-100A, y recibiendo un 1 de PC-1. Si B-100A se daña, PC-1 transmitirá un 0, indicándole a este controlador que debe apagar el ventilador.
- Relés PY-1 y PY-2: Simplemente convierten la señal eléctrica en neumática para controlar el equipo.

Figura 60.

Explicación del lazo de control especial.



Nota. Este circuito se conecta al equipo que necesite un sistema automático para controlar bombas y/o ventiladores.

No sobra decir que cuando un equipo se apaga, no vuelve a ser prendido en la duración del funcionamiento activo de la planta, que podría extenderse a semanas, por ello se enfatiza la importancia de realizar mantenimientos luego de cada operación. En caso de que ambos ventiladores operen por debajo de las condiciones necesarias, una propuesta es prender ambos y abrir la válvula de ventilación de mantenimiento para ayudar a desalojar el gas.

Por otra parte, en el lazo de control de la Figura 61, se explica el manejo del sistema de filtración que es técnicamente semiautomático.

8.3. Tuberías

En esta sección se hace el cálculo de los diámetros de tuberías necesarios para las diferentes partes del proceso. Se desarrolla por dos motivos: definir si los diámetros son realísticos y/o viables, y definir los tamaños de los equipos auxiliares a la hora de hacer el análisis financiero.

8.3.1. Ecuaciones

La ecuación 8.0 [109] es una heurística usada para calcular el diámetro de tubería óptimo.

$$H_{vel} = 1.3 + \frac{D}{6} \quad (8.0)$$

H_{vel} : Velocidad Heurística (m/s)

D: Diámetro (m)

La técnica involucra el gráfico de esa recta cruzada con lo que se denomina la verdadera velocidad, que se calcula como mostrado en la ecuación 8.1 [109].

$$V_{vel} = \frac{Q}{A} \quad (8.1)$$

V_{vel} : Velocidad Verdadera (m/s)

Q: Caudal (m^3/s).

8.3.2. Divisiones

El proceso se dividirá en varias secciones para discretizar la cantidad de diámetros de tubería necesarios. Primero se presentan todos los cálculos, y luego en la Figura 63 se visualizan todas las gráficas. Se utilizan las siguientes densidades:

Densidad aceite (kg/m^3)	Densidad agua (kg/m^3)
846	998,2

Sección: Pool IN

Condiciones de entrada:

Flujo másico	800	kg/s
Caudal	0,808	m ³ /s

Tabla 6.

Tabla para cálculo de diámetro óptimo de tubería Pool IN.

D (")	D (m)	Área (m2)	Heur Vel (ft/s)	Actual Vel (m/s)	Actual Vel (ft/s)
1	0,0254	0,0020	1,4667	395,4168	1297,3625
2	0,0508	0,0081	1,6333	98,8542	324,3406
3	0,0762	0,0182	1,8000	43,9352	144,1514
4	0,1016	0,0324	1,9667	24,7135	81,0852
6	0,1524	0,0730	2,3000	10,9838	36,0378
8	0,2032	0,1297	2,6333	6,1784	20,2713
10	0,2540	0,2027	2,9667	3,9542	12,9736
20	0,5080	0,8107	4,6333	0,9885	3,2434

Nota. Heur Vel: Velocidad Heurística; Actual Vel: Velocidad Real.

Sección: Separators IN

Condiciones de entrada:

Flujo másico	200	kg/s
Caudal	0,202	m ³ /s

Tabla 7.

Tabla para cálculo de diámetro óptimo de tubería Separators IN.

D (")	D (m)	Área (m ²)	Heur Vel (ft/s)	Actual Vel (m/s)	Actual Vel (ft/s)
1	0,0254	0,0020	1,4667	99,7434	327,2582
2	0,0508	0,0081	1,6333	24,9359	81,8145
3	0,0762	0,0182	1,8000	11,0826	36,3620
4	0,1016	0,0324	1,9667	6,2340	20,4536
6	0,1524	0,0730	2,3000	2,7707	9,0905
8	0,2032	0,1297	2,6333	1,5585	5,1134
10	0,2540	0,2027	2,9667	0,9974	3,2726
20	0,5080	0,8107	4,6333	0,2494	0,8181

Nota. Heur Vel: Velocidad Heurística; Actual Vel: Velocidad Real.

Sección: Separators WT OUT

Condiciones de entrada:

Flujo másico	190	kg/s
Caudal	0,192	m ³ /s

Tabla 8.

Tabla para cálculo de diámetro óptimo de tubería Separators WT OUT.

D (")	D (m)	Área (m ²)	Heur Vel (ft/s)	Actual Vel (m/s)	Actual Vel (ft/s)
1	0,0254	0,0020	1,4667	94,7562	310,8953
2	0,0508	0,0081	1,6333	23,6891	77,7238
3	0,0762	0,0182	1,8000	10,5285	34,5439
4	0,1016	0,0324	1,9667	5,9223	19,4310
6	0,1524	0,0730	2,3000	2,6321	8,6360
8	0,2032	0,1297	2,6333	1,4806	4,8577
10	0,2540	0,2027	2,9667	0,9476	3,1090
20	0,5080	0,8107	4,6333	0,2369	0,7772

Nota. Heur Vel: Velocidad Heurística; Actual Vel: Velocidad Real.

Sección: Separators OIL OUT y Reciclo Pool

Condiciones de entrada:

Flujo másico	8	kg/s
Caudal	0,008	m ³ /s

Tabla 9.

Tabla para cálculo de diámetro óptimo de tubería Separators OIL OUT y recicló POOL.

D (")	D (m)	Área (m ²)	Heur Vel (ft/s)	Actual Vel (m/s)	Actual Vel (ft/s)
1	0,0254	0,0020	1,4667	3,9897	13,0903
2	0,0508	0,0081	1,6333	0,9974	3,2726
3	0,0762	0,0182	1,8000	0,4433	1,4545
4	0,1016	0,0324	1,9667	0,2494	0,8181
6	0,1524	0,0730	2,3000	0,1108	0,3636
8	0,2032	0,1297	2,6333	0,0623	0,2045
10	0,2540	0,2027	2,9667	0,0399	0,1309

Nota. Heur Vel: Velocidad Heurística; Actual Vel: Velocidad Real.

Sección: COAG/FLOC System y WT OUT

Condiciones de entrada:

Flujo másico	760	kg/s
Caudal	0,768	m ³ /s

Tabla 10.

Tabla para cálculo de diámetro óptimo de tubería COAG/FLOC System y WT OUT.

D (")	D (m)	Área (m2)	Heur Vel (ft/s)	Actual Vel (m/s)	Actual Vel (ft/s)
1	0,0254	0,0020	1,4667	379,0250	1243,5810
2	0,0508	0,0081	1,6333	94,7562	310,8953
3	0,0762	0,0182	1,8000	42,1139	138,1757
4	0,1016	0,0324	1,9667	23,6891	77,7238
6	0,1524	0,0730	2,3000	10,5285	34,5439
8	0,2032	0,1297	2,6333	5,9223	19,4310
10	0,2540	0,2027	2,9667	3,7902	12,4358
20	0,5080	0,8107	4,6333	0,9476	3,1090

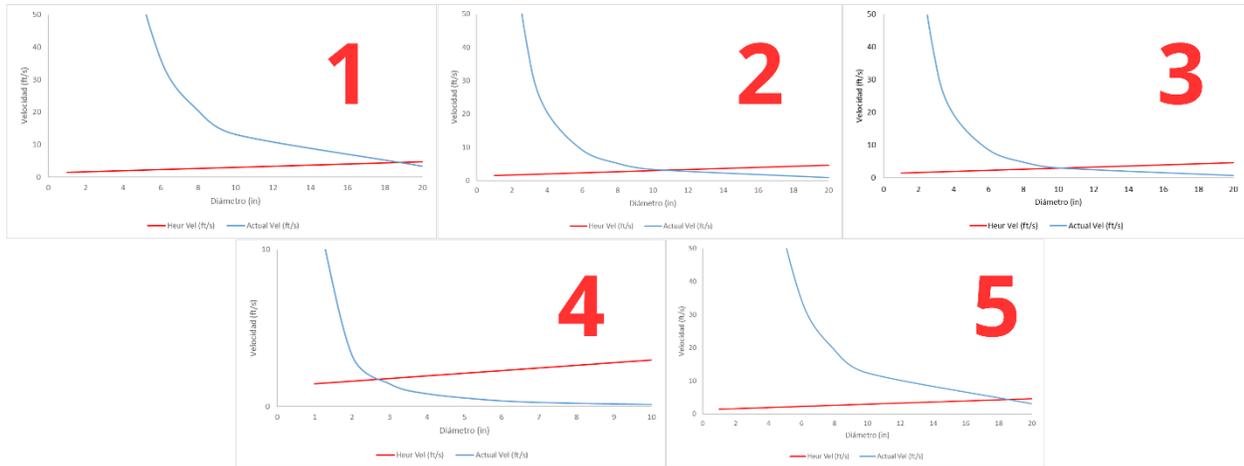
Nota. Heur Vel: Velocidad Heurística; Actual Vel: Velocidad Real.

Sección: GASES

Todos los ductos de ventilación son pseudo-arbitrariamente designados con un diámetro de 4 pulgadas.

Figura 62.

Gráficas para definir diámetros de tubería óptimos.



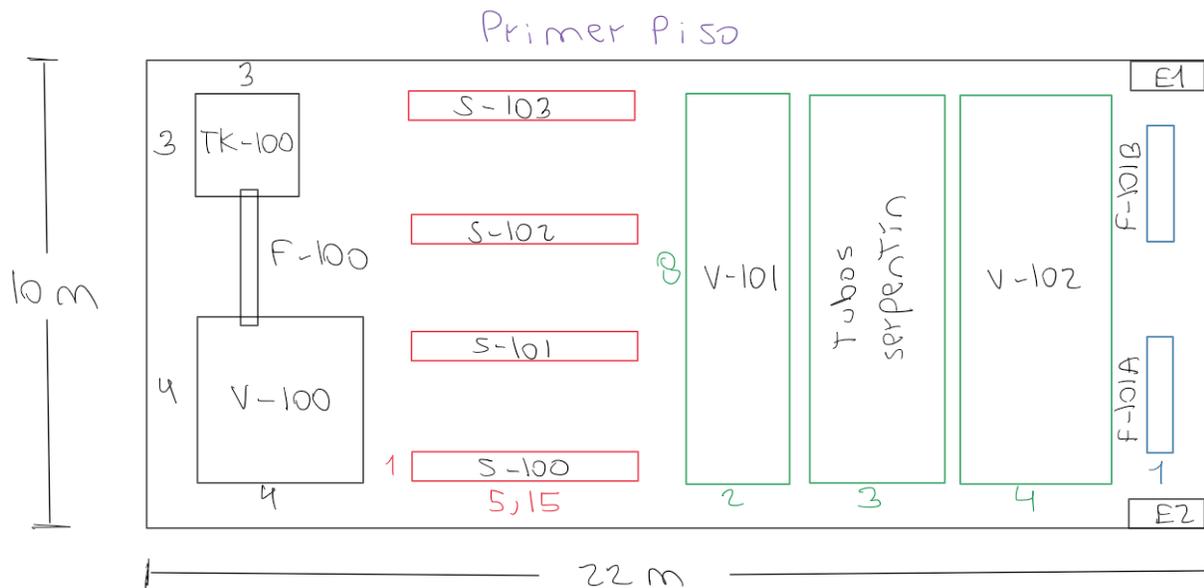
Nota. 1: Pool IN (19 in), 2: Separators IN (11 in), 3: Separators WT OUT (11 in), 4: Separators OIL OUT y Reciclo Pool (3 in), 5: COAG/FLOC System y WT OUT (19 in). Ver Anexo 3.

8.4. Disposición de equipos (Layout)

Normalmente este paso es muy técnico y requiere de las dimensiones precisas de todos los equipos, la distancia que debe haber entre ellos para mantenimiento, etc., por ello se definió en el alcance que no se haría detalladamente sino a nivel conceptual, porque se consideró que sería conveniente ofrecer una visualización de cómo se planea que se arreglen estos equipos en el barco. Para esto se presentan las Figuras 63, 64, 65 y 66, dibujadas modo boceto para poder entender rápidamente la disposición de equipos y estructuras.

Figura 63.

Boceto de disposición de equipos – primer piso.



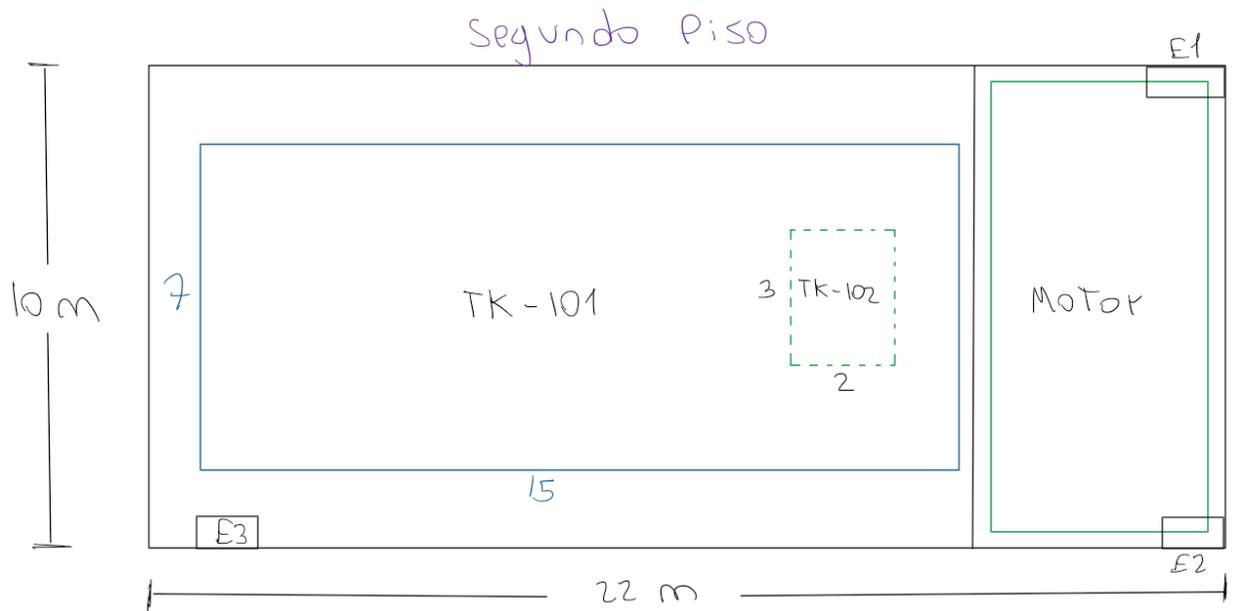
Nota. Los números al lado de cada equipo son sus dimensiones; E1: Escalera 1, E2: Escalera 2; dibujado por Pedro Solórzano Rivero en Microsoft OneNote [23].

El filtro F-100 realmente cubriría aéreamente la superficie de entrada a V-100, luego depositando en TK-100, para no complicar el dibujo se hizo como un puente que conecta los equipos.

Los tubos serpentín deben ser tan largos como sea posible, por lo que se estableció que podrían iniciar por encima del tanque V-101 y continuar por encima de V-102, añadiendo varios minutos de mezclado.

Figura 64.

Boceto de disposición de equipos – segundo piso.



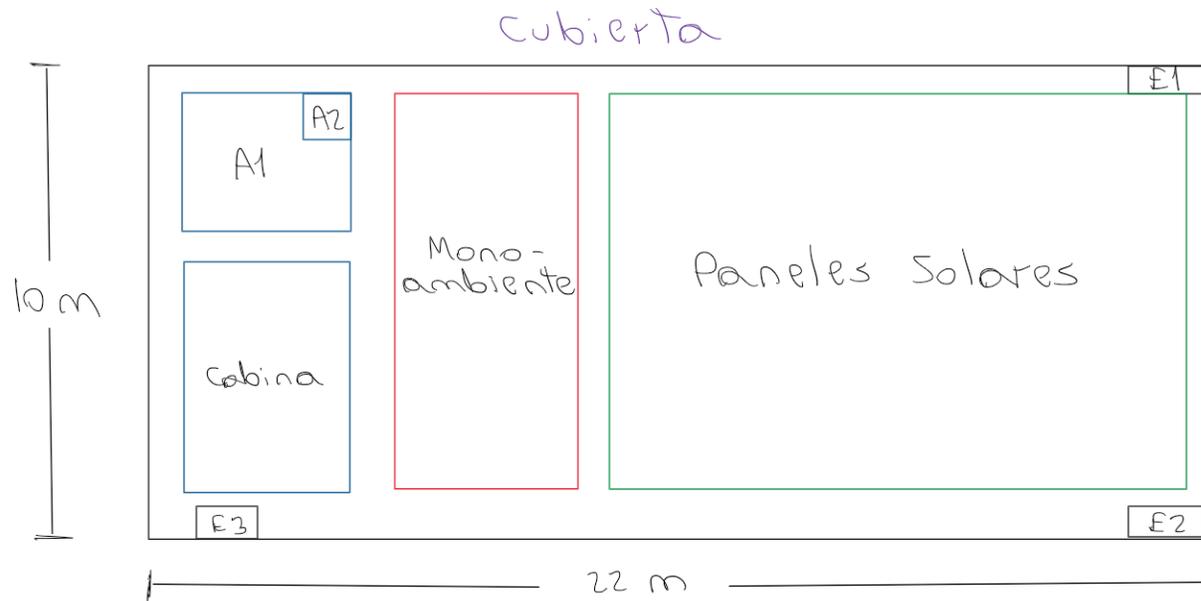
Nota. El motor es el del catamarán, el tamaño no está claro y de necesitar más espacio se puede modificar el del tanque TK-101; TK-102 reside conectado al techo del piso 1; E1: Escalera 1, E2: Escalera 2; E3: Escalera 3; dibujado por Pedro Solórzano Rivero en Microsoft OneNote [23].

El tanque TK-101 tendría dimensiones tan grandes como sea posible sin afectar la integridad estructural del barco considerando cuánto pesaría estando casi completamente lleno de aceite. Incluso se piensa que este tanque no necesita ser de acero inoxidable ya que nunca debería estar en condiciones de oxidarse y que podría hacerse de un polímero de gran resistencia para enormemente reducir el peso; sería algo que se puede estudiar.

Como se puede ver en la Figura 65, no están definidos los tamaños de estas secciones pues no se está tomando en cuenta completamente la verticalidad; se plantea lo necesario, pero todo (excepto tal vez la apertura de acopio) es susceptible a cambio de dimensiones.

Figura 65.

Boceto de disposición de equipos – cubierta.

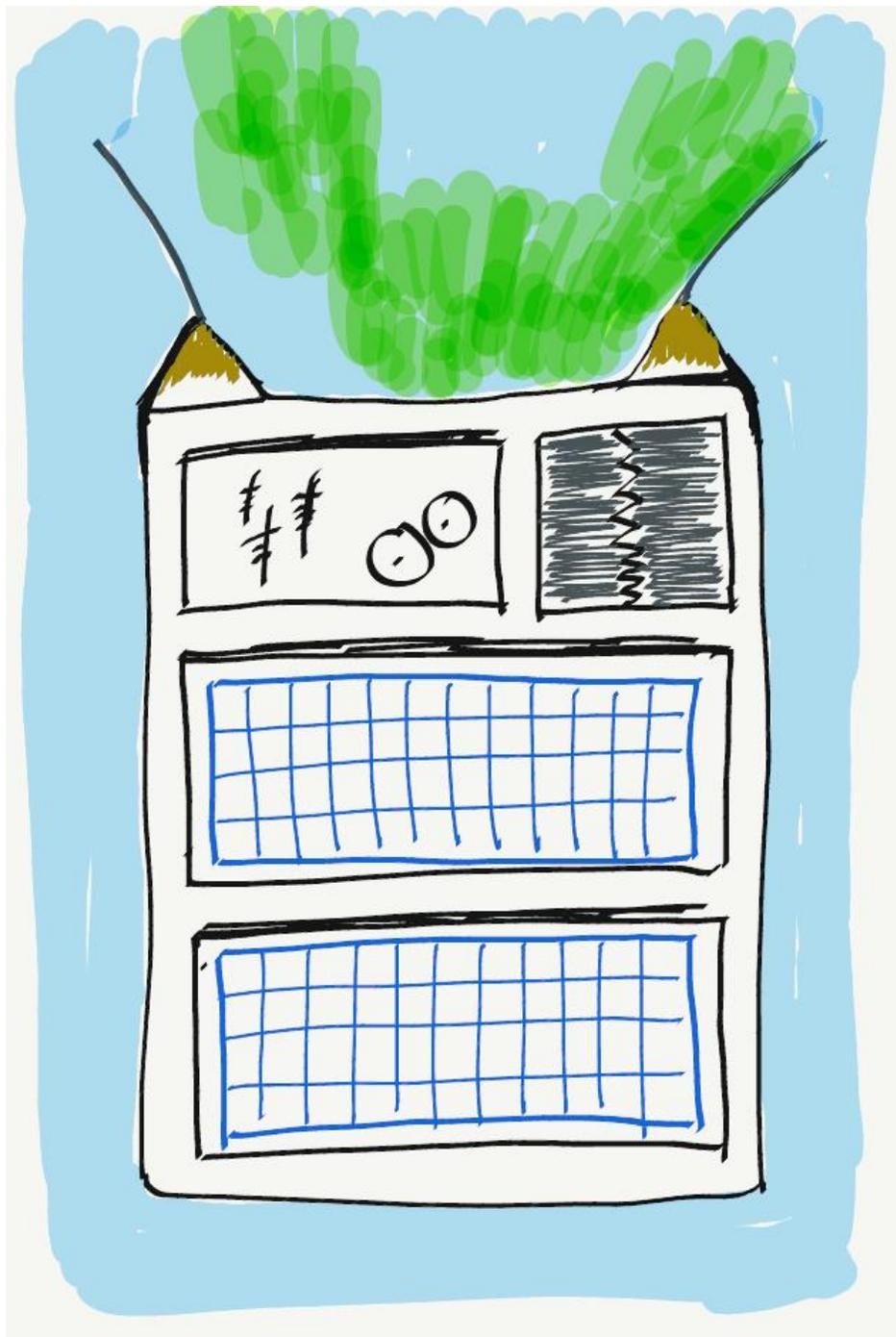


Nota. El Monoambiente hace referencia a la sección en dónde los tripulantes pueden descansar, comer, y entre otras actividades no relevantes a su trabajo; E1: Escalera 1, E2: Escalera 2, E3: Escalera 3, A1: Conexión de acopio de sólidos, A2: Conexión de acopio de aceite; dibujado por Pedro Solórzano Rivero en Microsoft OneNote [23].

La Figura 66 es un rediseño de cómo se vería el barco en un plano superior.

Figura 66.

Vista Top rediseñada.



Nota. Rediseño de la figura 13 incluyendo instalaciones. Dibujado por Pedro Solórzano Reyes en Microsoft OneNote [23].

Figura 67.

Boceto primitivo 3D.



Nota. Nombre preliminar “*The Oil Whale – MK1*” inspirado en la forma en la que una ballena consume presas, y MK1 como versión corta de Mark 1; dibujado por Pedro Solórzano Reyes en Microsoft OneNote [23].

La Figura 67 se presenta para visualizar los diferentes “pisos” del barco, entendiendo que es decentemente alto, pero como mencionado, muchas dimensiones están sujetas a cambios futuros.

8.5. Mantenimiento

Esta sección es una idea para resolver el problema de espaciado de equipos a la hora de hacer mantenimiento que presenta la disposición de equipos propuesta.

Luego de cada operación el barco se conduce al puerto, muy probablemente en su propio hangar. Dentro de este hangar se plantea que el barco no sea una sola pieza, sino que sea una combinación de muchas piezas con facilidad para desmontaje, muy similar al sistema que usa la empresa Hy-Conn Inc. para conectar mangueras de bomberos a hidrantes; visualizar Figura 68 y de ser posible ver video (20 segundos).

Figura 68.

Conexiones usadas por empresa Hy-Conn Inc.



Nota. Tomado de: Connect 3 Hy Conn Adaptors in under 20 seconds [En línea]. Disponible: <https://www.youtube.com/watch?v=rsNTMOydPDQ> [Accedido: nov.01.23]

A una persona entrenada le tomaría al menos 1 o 2 minutos conectar mangueras convencionales a hidrantes, esta invención permite conectarlas fácilmente y son posiblemente más herméticas que las convencionales.

Adicionalmente en la industria del petróleo se usa algo llamado fracturing tree (árbol fracturado), como el presentado en la Figura 69, para fácilmente conectar y desconectar una enorme cantidad de equipos.

Figura 69.

Fracturing Tree.



Nota. Tomado de: Saigaogroup [En línea]. Disponible: [https://www.saigaogroup.com/product/fracturingtree.html#:~:text=The%20fracturing%20tree%20\(frac%20tree,and%20other%20types%20of%20wells](https://www.saigaogroup.com/product/fracturingtree.html#:~:text=The%20fracturing%20tree%20(frac%20tree,and%20other%20types%20of%20wells). [Accedido: nov.01.23]

Se plantea la posibilidad de un diseño desarmable, de forma que se pueda hacer un mantenimiento eficiente. Una idea audaz, es que el barco sea capaz de literalmente abrirse por el techo, para permitir que una grúa separe las piezas internas. Elaborando en esa idea se presenta la Figura 70.

Combinado con el boceto primitivo 3D de la Figura 67, sería posible que todas las secciones del barco sean acoplables y desacoplables con una grúa en el puerto.

Figura 70.

Casa de “armable” de Boxabl.



Nota. Tomado de: CNET [En línea]. Disponible: <https://www.cnet.com/home/services/boxabl-aims-to-build-foldable-homes-that-cut-costs-go-up-fast/> [Accedido: nov.07.23]

8.6. Costos

A continuación, se presentan las tablas de costos de los equipos principales, auxiliares y accesorios, en todas las medidas estimadas y cantidades requeridas. Cabe aclarar que no se evaluará el costo de ninguna de las ideas adicionales planteadas en la sección de mantenimiento. Todos los materiales están planteados como acero inoxidable para resistir corrosión.

Tabla 11.*Tabla de costos de equipos principales.*

Equipo	Descripción	Cantidad	Precio/Unidad (U\$D)	Precio Neto (U\$D)	Referencia
Filter (F-100)	Mecanismo a modo cadena de ensamblaje con rodillos.	1	294	294	[110]
Filter (F-101)	Filtros plisados lavables y reusables. 4.5"D por unidad, es necesario filtrar 13" por lo que la unidad se tomará como el costo de 3 unidades.	10	144	1440	[111]
Vessel (V-100)	Dimensiones: 4 x 4 x 4 (64 m3)	1,33	14500	19285	[112]
Vessel (V-101)	Dimensiones: 2 x 8 x 3 (48 m3)	1	14500	14500	[112]
Vessel (V-102)	Dimensiones: 4 x 8 x 4 (128 m3)	2,67	14500	38715	[112]
Tank (TK-100)	Dimensiones: 3 x 3 x 2 (18 m3)	0,375	14500	5438	[112]
Tank (TK-101)	Dimensiones: 15 x 7 x 2 (210 m3)	4,375	14500	63438	[112]
Tank (TK-102)	Dimensiones: 2 x 3 x 1 (6 m3)	0,125	14500	1812,5	[112]
Separator (S)	Dimensiones: 5,15 x 1 x 2,5 (\approx 13 m3). Se aproxima el precio usando como referencia un separador trifásico convencional.	4	30000	120000	[113]

Nota. Precio en dólares para mejor visualizar magnitud. En la columna "Cantidad" hay decimales, esto es porque se eligió un tamaño referencia y se calculó el precio relativo en base a eso. Las dimensiones están dadas como longitud x profundidad x altura (viendo a la planta de perfil lateral).

Tabla 12.

Tabla de costos de equipos auxiliares y accesorios de 19" de diámetro.

19"					
Auxiliar	Descripción	Cantidad	Precio/Unidad (U\$D)	Precio Neto (U\$D)	Referencia
Digital Valve (DV)	Válvula digital	12	120,29	1443,48	[114]
Normally Closed Valve (NCV)	Válvula digital	4	120,29	481,16	[114]
Digital Check Valve (DCV)	Swing check valve	6	87,81	526,86	[114]
Digital Level Valve (DLV)	Válvula digital	1	120,29	120,29	[114]
Digital Weight Valve (DWV)	Válvula digital	0	120,29	0	[114]
Pump	Bomba hidráulica (Potencia no calculada). Precio va de 1000-10000 USD, se toma 10000 para este por tamaño necesario.	4	10000	40000	[115]
Fan	Ventilador (Potencia no calculada). Outer Rotor Axial Flow Fan with Diameter 200-630 mm, precio redondeado a 100 por tamaño.	0	100	0	[116]

Nota. Precio en dólares para mejor visualizar magnitud.

Tabla 13.

Tabla de costos de equipos auxiliares y accesorios de 11" de diámetro.

11"					
Auxiliar	Descripción	Cantidad	Precio/Unidad (U\$D)	Precio Neto (U\$D)	Referencia
Digital Valve (DV)	Válvula digital	21	120,29	2526,09	[114]
Normally Closed Valve (NCV)	Válvula digital	8	120,29	962,32	[114]
Digital Check Valve (DCV)	Swing check valve	16	87,81	1404,96	[114]
Digital Level Valve (DLV)	Válvula digital	16	120,29	1924,64	[114]
Digital Weight Valve (DWV)	Válvula digital	0	120,29	0	[114]
Pump	Bomba hidráulica (Potencia no calculada). Precio va de 1000-10000 USD, se toma 7000 para este por tamaño necesario.	16	7000	112000	[115]
Fan	Ventilador (Potencia no calculada). Outer Rotor Axial Flow Fan with Diameter 200-630 mm, precio redondeado a 100 por tamaño.	0	100	0	[116]

Nota. Precio en dólares para mejor visualizar magnitud.

Tabla 14.

Tabla de costos de equipos auxiliares y accesorios de 4" de diámetro.

4"					
Auxiliar	Descripción	Cantidad	Precio/Unidad (U\$D)	Precio Neto (U\$D)	Referencia
Digital Valve (DV)	Válvula digital	35	120,29	4210,15	[114]
Normally Closed Valve (NCV)	Válvula digital	18	120,29	2165,22	[114]
Digital Check Valve (DCV)	Swing check valve	0	87,81	0	[114]
Digital Level Valve (DLV)	Válvula digital	0	120,29	0	[114]
Digital Weight Valve (DWV)	Válvula digital	0	120,29	0	[114]
Pump	Bomba hidráulica (Potencia no calculada). Precio va de 1000-10000 USD, se toma 4000 para este por tamaño necesario.	0	4000	0	[115]
Fan	Ventilador (Potencia no calculada). Outer Rotor Axial Flow Fan with Diameter 200-630 mm, precio redondeado a 100 por tamaño.	18	100	1800	[116]

Nota. Precio en dólares para mejor visualizar magnitud.

Tabla 15.

Tabla de costos de equipos auxiliares y accesorios de 3" de diámetro.

3"					
Auxiliar	Descripción	Cantidad	Precio/Unidad (U\$D)	Precio Neto (U\$D)	Referencia
Digital Valve (DV)	Válvula digital	11	120,29	1323,19	[114]
Normally Closed Valve (NCV)	Válvula digital	5	120,29	601,45	[114]
Digital Check Valve (DCV)	Swing check valve	10	87,81	878,1	[114]
Digital Level Valve (DLV)	Válvula digital	0	120,29	0	[114]
Digital Weight Valve (DWV)	Válvula digital	1	120,29	120,29	[114]
Pump	Bomba hidráulica (Potencia no calculada). Precio va de 1000-10000 USD, se toma 2000 para este por tamaño necesario.	10	2000	20000	[115]
Fan	Ventilador (Potencia no calculada). Outer Rotor Axial Flow Fan with Diameter 200-630 mm, precio redondeado a 100 por tamaño.	0	100	0	[116]

Nota. Precio en dólares para mejor visualizar magnitud.

Gran Total = 457.410 USD

8.6.1. Bondad financiera

La bondad financiera es un análisis económico que se le aplica a un proyecto para conocer su rentabilidad a un plazo determinado, que normalmente suele ser de 10 a 20 años; en este caso se planteará a 10 años considerando la alta posibilidad de tener que

renovar la tecnología del barco en ese tiempo, o incluso antes [117]. En la Figura 71 se referencia un barco con dimensiones similares a lo necesitado.

Figura 71.

Imagen de catamarán Catana 62.



Nota. Tomado de: TopBarcos.com [En línea]. Disponible: <https://www.topbarcos.com/oferta-barcos-nuevos/catana-62> [accedido: oct.10.2022]

Tabla 16.

Dimensiones y especificaciones del Catana 62.

Eslora	18,68 m	Marca	Catana	Año	2021
Manga	9,49 m	Modelo	62	Tipo	Catamarán
Calado	1,56 m	Motor	2 x 110 HP	Combustible	Diesel
Depósito Combustible	860 l	Desplazamiento	19200,0 t	Depósito Agua	800 l

Nota. m: metro; l: litro; HP: Horse Power (Caballo de fuerza).

Tabla 17.*Resumen de costos de inversión y operación.*

Costos de Inversión		
Precio Equipos	457.410	USD
Precio Barco	16.819.812 [118]	USD
Precio Construcción	34.550.817 [109]	USD
Costos de Operación		
Precio Combustible	15.600 [119]	USD/año
Precio Mantenimiento	45.560 [109]	USD/año
Precio Mano de Obra	178.284 [120]	USD/año

Nota. El precio de construcción se estimó como el doble del precio de barco y equipos. El precio de mantenimiento se estimó como el 10% del precio de equipos. Mano de obra se calcula asumiendo 3 operarios con salario promedio de Estados Unidos.

Tabla 18.*Tabla de Ingresos y Egresos.*

	Año 0	Año 1	Año 2	Año 3	Año 4	Año 5
INGRESOS						
Operacionales		12.000.000	12.480.000	12.979.200	13.498.368	14.038.303
EGRESOS						
Costos de operación		239,444	249,021	258,982	269,342	280,115
Costos de inversión	51.826.226					
Flujo Neto	-51.826.226	11,760,556	12,230,979	12,720,218	13,229,026	13,758,187

	Año 6	Año 7	Año 8	Año 9	Año 10
INGRESOS					
Operacionales	14.599.835	15.183.828	15.791.181	16.422.829	17.079.742
EGRESOS					
Costos de operación	291,320	302,973	315,092	327,695	340,803
Costos de inversión					
Flujo Neto	14,308,515	14,880,856	15,476,090	16,095,133	16,738,939

Nota. El costo de inversión es la sumatoria de precios de equipos, barco y construcción. Cabe aclarar que en costos de operación no se tomó en cuenta el costo del Floculante/Coagulante pues no se tiene registro conciso de ese precio, considerando la magnitud del costo de inversión se definió innecesario especular. Precio en dólares para mejor visualizar magnitud.

Tabla 19.

Tabla de definición del TIO.

DTF	IPC	Rentabilidad Mínima	TIO
2%	4%	15%	21%

Nota. Valores estándar.

Tabla 20.

Tabla de indicadores de bondad financiera.

INDICADORES DE BONDAD FINANCIERA	
Valor Neto Actual (VNA) (U\$D)	53.958.201
Valor Presente Neto (VPN) (U\$D)	2.130.163
Tasa Interna de Retorno (TIR)	22,15%
VNA de los Beneficios (U\$D)	55.056.785
VNA de los Costos de Operación + Costos Inversión (U\$D)	52.926.622
Relación Beneficio/Costo (RB/C)	1,04

Nota. El RB/C puede ser un poco menor, pero se redondeó el ingreso operacional por conveniencia.

8.6.2. Análisis financiero

La mayoría de los que lean estos números inicialmente pensarán que este proyecto definitivamente no es factible, así que se agregará un poco de contexto para garantizar cambiar esa opinión.

En el concepto se mencionó que este barco no un producto, sino un servicio, y más explícitamente un seguro, ¿qué seguros hay? Seguro de automóvil, seguro de inmueble, seguro de vida, etc. A continuación, se hará una pequeña descripción general de cada uno de estos seguros y finalmente compararlos con este nuevo seguro planteado.

8.6.2.i. Seguro de automóvil. En Colombia, un seguro de automóvil nunca debería superar el 10% deducible por tipo de accidente, ya sea robo, destrucción o desastres naturales [121], en general los precios oscilan entre \$900.000 COP (220 USD) y \$11.000.000 COP (2.691 USD) [122], lo cual en términos de porcentajes parece empezar a partir del 2% del precio del vehículo.

En Estados Unidos, los seguros oscilan entre 2% y hasta el 20% del precio del vehículo en casos especiales (como terremotos o huracanes, que suceden con más frecuencia en algunos departamentos) [123]; es decir, un vehículo de \$100.000 USD podría costar de \$2.000 USD a \$20.000 USD de prima anual del seguro.

8.6.2.ii. Seguro de inmueble. Similar a los seguros automovilísticos, el seguro de hogar parece iniciar en 2%, pero este valor puede incrementar significativamente según las opciones de cobertura que se elijan [124]. Ese porcentaje base también es mencionado en referencias estadounidenses como Bankrate [125]. Por ejemplo, un inmueble de \$150.000 USD tendrá un seguro empezando en \$3.000 USD en promedio [125], claro que este valor varía según la aseguradora que se contrate.

8.6.2.iii. Seguro de vida. Para seguros de vida la logística no cambia, e incluso se vuelve más compleja, pues la cantidad de factores que se toman en cuenta para cotizar son numerosos. La compañía Cica Life [126], basada en Estados Unidos, ofrece en uno de sus planes la posibilidad de una prima de hasta \$10.000 USD anuales [127]; existen planes con primas mayores, pero se usará este de ejemplo. En Estados Unidos el salario anual promedio se reporta en \$59.428 USD en 2023 [128], mientras que en 2022 fuentes

sugieren que el valor ronda entre \$74.580 USD y \$105.555 USD, pero en general se consigue que debiera estar alrededor de \$75.000 USD [129]–[131]. Considerando estos valores, un seguro de vida para el trabajador promedio podría llegar a costar el 13-14% de su salario anual, o menos si opta por planes de menor prima, pero imaginando una prima del 10% de lo planteado (\$1.000 USD), el porcentaje anual seguiría rondando por encima del 1% del salario anual.

8.6.2.iv. Seguro Ecológico. Este seguro es ligeramente distinto a los anteriores, en sentido de que es irrelevante a quien se le esté vendiendo, el precio no cambia según un número dado de factores, pues no el funcionamiento del barco será el mismo sin importar las condiciones. Se mostrará mediante 3 ejemplos el impacto que tiene el seguro en los estados financieros de las empresas seleccionadas. Si bien no es absoluta la necesidad de que las empresas a las que se les vende el seguro tengan plataformas marítimas, por cuestiones de tomar muestras representativas, las empresas seleccionadas contarán con 3 cantidades distintas de plataformas.

- Ejemplo 1:

Se reporta que al año 2018, la empresa petrolera **Pemex** contaba con 45 plataformas marítimas [132]. En 2022, sus estados financieros reportan \$116.000.000.000 USD [133]. Si esta empresa fuese a contratar el seguro a un precio de \$12.000.000 USD anuales, esto representaría ligeramente por encima del **0.01%** de su patrimonio neto anual.

- Ejemplo 2:

Se reporta que al año 2018, la empresa petrolera **Shell** contaba con 30 plataformas marítimas [132]. En 2023, sus estados financieros reportan \$218.300.000.000 USD [134]. Si esta empresa fuese a contratar el seguro a un precio de \$12.000.000 USD anuales, esto representaría ligeramente por encima del **0.005%** de su patrimonio neto anual.

- Ejemplo 3:

Se reporta que al año 2018, la empresa petrolera **Chevron** contaba con 17 plataformas marítimas [132]. En 2023, sus estados financieros reportan \$275.000.000.000 USD [135].

Si esta empresa fuese a contratar el seguro a un precio de \$12.000.000 USD anuales, esto representaría ligeramente por encima del **0.004%** de su patrimonio neto anual.

Para dar incluso más contexto, según el *Clean Water Act (CWA)*, cada barril derramado tiene una multa de \$1.100 USD o hasta \$4.300 USD si se define que el accidente ocurrió por negligencia [136], [137]. Si una compañía X derramara 100.000 barriles en el año Y, esta deberá pagar entre \$110.000.000 USD y \$430.000.000 USD en ese año; en otras palabras, no sólo perdieron 100.000 barriles, que en gran parte no pudieron recuperar, lo cual ya supone gran pérdida económica, sino que también sufren por las multas. Cualquier accidente en alta mar representa grandes pérdidas a la empresa responsable. Esta es una forma muy fría de analizar la problemática puesto que sólo se evalúa lo económico y el punto de vista de la empresa, pero para todo proyecto es necesario poder visualizar objetivamente la factibilidad de la propuesta.

La razón por la que todos los ejemplos se basaron en la base de cálculo de \$12.000.000 USD es que a pesar del análisis hecho comparando los porcentajes usuales que los seguros imponen, es difícil saber si realmente se podría cobrar un 2% de prima anual, eso requeriría un análisis financiero más avanzado, lo cual no es objeto de este trabajo; sin embargo, la información sugiere que es posible una prima mucho mayor a la planteada, promoviendo enormemente la factibilidad del proyecto.

9. CONCLUSIONES

Conclusiones generales

Se ha completado el diseño conceptual de un barco catamarán con capacidad para limpiar aguas contaminadas por derrames de componentes oleosos en deltas grandes, mares y océanos.

El poder de este barco está detrás de su flexibilidad para adaptarse a las condiciones exteriores, por ello, no es lógico establecer unas condiciones de operación fijas, sino diseñar un sistema que permita que el proceso entero se adapte dinámicamente; esta adaptación es decidida por la unidad central de separación, pues según la composición del flujo, modifica la velocidad de procesamiento para constantemente garantizar la máxima eficiencia aceite, eficiencia *water* y potencial diario posible.

Conclusiones específicas

Diseñar la unidad central de separación del proceso.

Originalmente se quería dibujar un modelo 3D, pero tras complicaciones computacionales, se hizo uno 2D. Técnicamente era posible hacer una visualización 3D conceptual, pero se consideró innecesario, pues simplemente sería la versión 2D con profundidad de 1 metro.

Pensando en que el separador quedó con 1 metro de profundidad deja la duda de si se podría duplicar este número, y con ello, duplicar el potencial diario de barriles; no sería correcto haberlo dado por hecho sin simularlo.

Simular con CFD el funcionamiento de la unidad central de separación.

En la tabla 21 se concluye/n la/s velocidad/es recomendada/s para usar según la composición.

Tabla 21.

Velocidades recomendadas según composición.

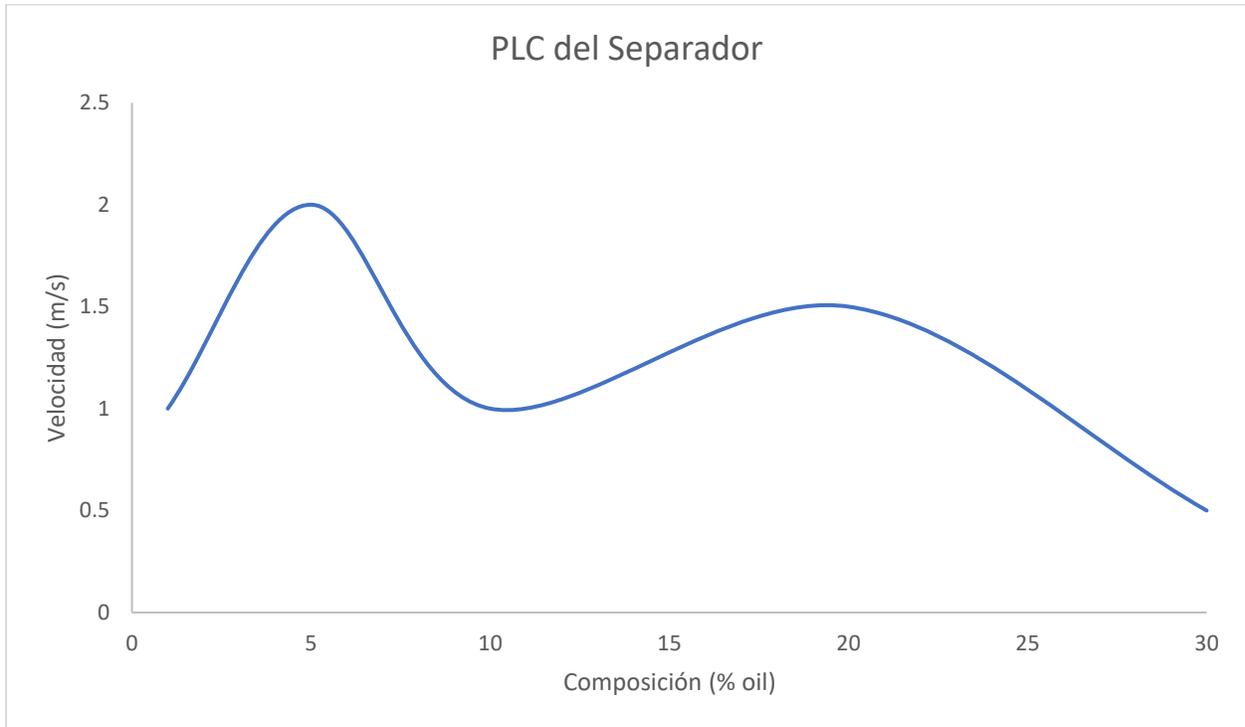
Velocidad (m/s)	% Oil
0,5 o 1,0	30
1,5	20
1,0	10
1,5 o 2,0	5
1,0	1

Nota. Las columnas están clasificadas con colores haciendo referencia a la tabla 2.

La razón por la que no se selecciona inmediatamente una velocidad por composición es por falta de información; idealmente se debería simular más veces por velocidad y probar más velocidades (así como más composiciones) para poder desarrollar una gráfica de funcionamiento; se plantea la gráfica de la Figura 72 para expresar la idea de cómo se controlaría el *inlet* automáticamente.

Figura 72.

Planteamiento de Programmable Logic Controller (PLC) del Proceso.



Nota. Usando la tabla 6 seleccionando 0,5 m/s para 30% *oil* y 2,0 m/s para 5% *oil* con la intención de expresar todo el rango posible.

En promedio, los resultados indicaron gran estabilidad a 1 m/s, que hace referencia a un flujo másico de 190 a 200 kg/s de fluido; en base a este valor se regula la velocidad del barco, todo mediante automatización previamente programada o manejada hasta cierto punto con inteligencia artificial. Con este PLC se obtiene un sistema capaz de adaptarse automáticamente a un amplio rango de condiciones.

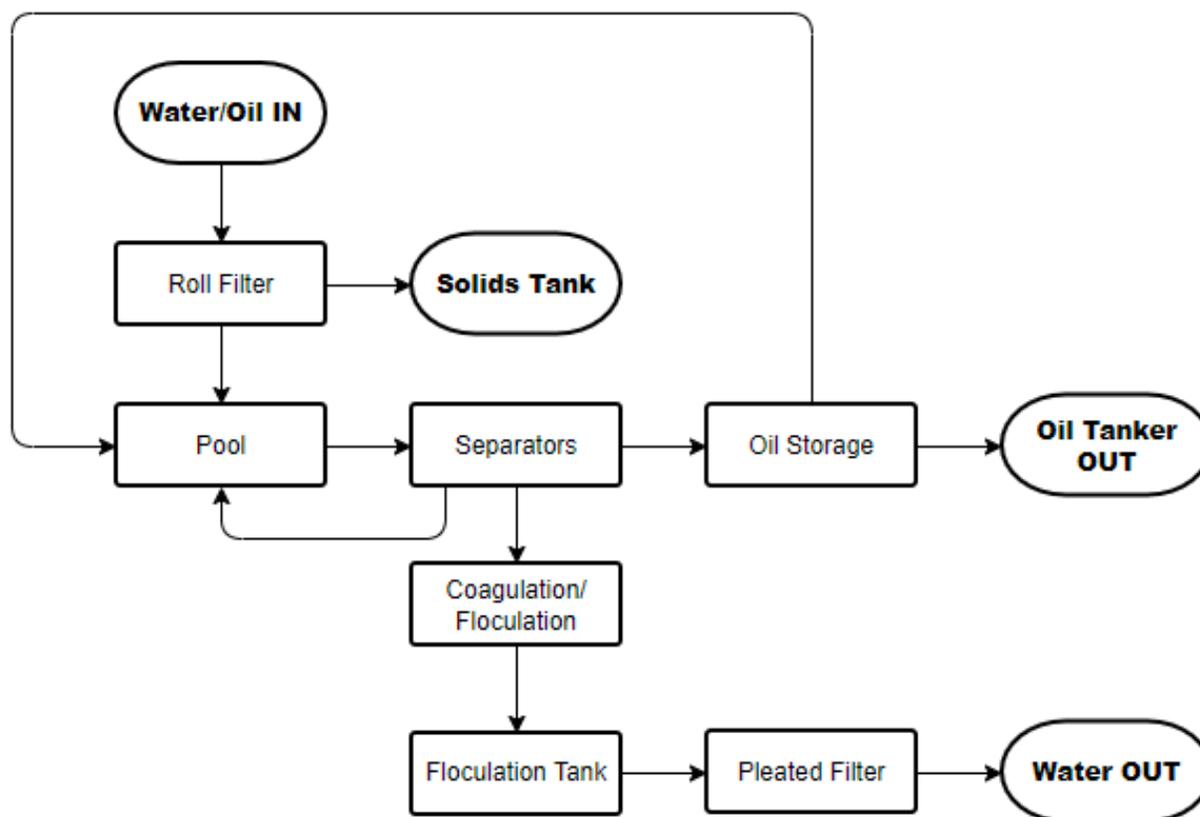
Por otra parte, en cuanto a la estimación del error de la simulación, todos los residuales siempre dieron el mismo valor promedio a pesar de que cada vez había notablemente más masa, posiblemente el error no estaba relacionado a la cantidad de masa entrante sino a errores causados por mala calidad ortogonal en alguna/s zona/s de la malla. Si este es el caso, la incidencia del error puede ser negligible para esta etapa de experimentación.

Diseño conceptual parcial de la planta.

Una consideración tomada tras obtener los resultados de la simulación es que sería conveniente implementar un sistema de recirculación entre los separadores y el *pool*, el funcionamiento de éste sería mediante sensores en las salidas de los separadores que dictarían mediante un PLC si el agua contiene mucho aceite (por cualquier motivo), una válvula de bifurcación redirige el flujo en la respectiva salida al *pool*, de esta forma es posible recuperar más aceite, y el sistema de coagulación/floculación puede ser más eficiente con la cantidad de material que libera al proceso.

Figura 73.

Diagrama BFD actualizado.



Nota. Dibujado por Pedro Solórzano Rivero en Visual Paradigm Online [51].

Originalmente el diseño estaba apuntado a 50.000 bbls recogidos en 16 días, sin embargo, la eficiencia conseguida con la simulación sugiere que sería posible aproximadamente 8700 bbls/día por cada separador, teniendo 4 de estos equipos se

conseguirían 34.800 bbls/día para todo el proceso. En otras palabras, en el mismo tiempo planteado sería viable la recolección de **556.800 barriles**.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] “Fossil fuel | Meaning, Types, & Uses | Britannica.” Accessed: Mar. 02, 2023. [Online]. Available: <https://www.britannica.com/science/fossil-fuel>
- [2] “Offshore Drilling: History and Overview - Offshore Energy.” Accessed: Mar. 03, 2023. [Online]. Available: <https://www.offshore-energy.biz/offshore-drilling-history-and-overview/>
- [3] “Global land & offshore oil rig count 2021 | Statista.” Accessed: Mar. 03, 2023. [Online]. Available: <https://www.statista.com/statistics/1128408/number-of-global-oil-rigs-by-type/>
- [4] “Oil tanker | ship | Britannica.” Accessed: Mar. 02, 2023. [Online]. Available: <https://www.britannica.com/technology/oil-tanker>
- [5] “What Are Natural Oil Seeps? | response.restoration.noaa.gov.” Accessed: Sep. 27, 2022. [Online]. Available: <https://response.restoration.noaa.gov/oil-and-chemical-spills/oil-spills/resources/what-are-natural-oil-seeps.html>
- [6] “How Do Spills Happen? | response.restoration.noaa.gov.” Accessed: Mar. 02, 2023. [Online]. Available: <https://response.restoration.noaa.gov/training-and-education/education-students-and-teachers/how-do-spills-happen.html>
- [7] “45 Years after the Santa Barbara Oil Spill, Looking at a Historic Disaster Through Technology | response.restoration.noaa.gov.” Accessed: Mar. 03, 2023. [Online]. Available: <https://response.restoration.noaa.gov/about/media/45-years-after-santa-barbara-oil-spill-looking-historic-disaster-through-technology.html>
- [8] “Statistics - ITOPF.” Accessed: Mar. 04, 2023. [Online]. Available: <https://www.itopf.org/knowledge-resources/data-statistics/statistics/>
- [9] “IXTOC I; Bahia de Campeche, Mexico | IncidentNews | NOAA.” Accessed: Mar. 04, 2023. [Online]. Available: <https://incidentnews.noaa.gov/incident/6250>
- [10] “Deepwater Horizon – BP Gulf of Mexico Oil Spill | US EPA.” Accessed: Mar. 04, 2023. [Online]. Available: <https://www.epa.gov/enforcement/deepwater-horizon-bp-gulf-mexico-oil-spill>
- [11] “The Gulf War Oil Spill: A Man-made Disaster | Environment & Society Portal.” Accessed: Mar. 04, 2023. [Online]. Available: <https://www.environmentandsociety.org/tools/keywords/gulf-war-oil-spill-man-made-disaster>

- [12] "Oil spills | National Oceanic and Atmospheric Administration." Accessed: Mar. 01, 2023. [Online]. Available: <https://www.noaa.gov/education/resource-collections/ocean-coasts/oil-spills>
- [13] "Coping in the Aftermath of Deepwater Horizon | response.restoration.noaa.gov." Accessed: Mar. 04, 2023. [Online]. Available: <https://response.restoration.noaa.gov/about/media/coping-aftermath-deepwater-horizon.html>
- [14] "En Protección Del Medio Ambiente | Markleen." Accessed: Aug. 21, 2023. [Online]. Available: <https://markleen.com/es/>
- [15] "About our agency | National Oceanic and Atmospheric Administration." Accessed: Aug. 21, 2023. [Online]. Available: <https://www.noaa.gov/about-our-agency>
- [16] "Recuperacion Hidrocarburos Multi Skimmers MS 30 | MARKLEEN." Accessed: Oct. 01, 2022. [Online]. Available: <https://markleen.com/es/soluciones-derrames/skimmers-multi-skimmers-30/>
- [17] "Técnicas Recuperacion Derrames Petróleo En El Mar | MARKLEEN." Accessed: Sep. 05, 2022. [Online]. Available: <https://markleen.com/es/respuestas-derrames/limpieza-derrames-petroleo-mar/>
- [18] "In Situ Burning | response.restoration.noaa.gov." Accessed: Aug. 21, 2023. [Online]. Available: <https://response.restoration.noaa.gov/oil-and-chemical-spills/oil-spills/resources/in-situ-burning.html>
- [19] "How NOAA Responds to Oil Spills | response.restoration.noaa.gov." Accessed: Mar. 04, 2023. [Online]. Available: <https://response.restoration.noaa.gov/oil-and-chemical-spills/oil-spills/how-noaa-responds-oil-spills.html>
- [20] "Rivers • The Interceptor • The Ocean Cleanup." Accessed: Sep. 05, 2022. [Online]. Available: <https://theoceancleanup.com/rivers/>
- [21] "Wastewater Treatment Systems - Pure Aqua, Inc." Accessed: Sep. 27, 2022. [Online]. Available: <https://pureaqua.com/waste-water-treatment/>
- [22] "Containerized Membrane BioReactor Wastewater Treatment System." Accessed: Oct. 08, 2023. [Online]. Available: <https://pureaqua.com/mobile-containerized-wastewater-treatment-system/>

- [23] "Microsoft OneNote Digital Note Taking App | Microsoft 365." Accessed: Nov. 04, 2023. [Online]. Available: <https://www.microsoft.com/en-us/microsoft-365/onenote/digital-note-taking-app>
- [24] "Explaining the Interceptor | Cleaning Rivers | The Ocean Cleanup - YouTube." Accessed: Nov. 04, 2023. [Online]. Available: <https://www.youtube.com/watch?v=bm1rH70wfJo>
- [25] "Oil Types | response.restoration.noaa.gov." Accessed: Oct. 05, 2023. [Online]. Available: <https://response.restoration.noaa.gov/oil-and-chemical-spills/oil-spills/oil-types.html>
- [26] "Statistics - ITOPF." Accessed: Oct. 05, 2023. [Online]. Available: <https://www.itopf.org/knowledge-resources/data-statistics/statistics/>
- [27] "resolucion-0883-de-2018 (Reglamentación de vertimiento en aguas marítimas)".
- [28] "tratamiento de aguas contaminadas archivos - SPENA GROUP Tratamiento de Aguas Residuales." Accessed: Oct. 04, 2022. [Online]. Available: <https://spenagroup.com/tag/tratamiento-de-aguas-contaminadas/>
- [29] "Coagulación, floculación y separación | SSWM - Find tools for sustainable sanitation and water management!" Accessed: Oct. 09, 2022. [Online]. Available: <https://sswm.info/es/gass-perspective-es/tecnologias-de-agua-y-saneamiento/tecnologias-de-abastecimiento-de-agua/coagulaci%C3%B3n-floculaci%C3%B3n-y-separaci%C3%B3n>
- [30] "Guía de Operaciones, Procesos e Instalaciones Industriales." Accessed: Oct. 09, 2022. [Online]. Available: <http://www4.ujaen.es/~ecastro/proyecto/operaciones/movimiento/sedimentacion.html>
- [31] "Tratamiento Primario del Agua y Aguas Residuales - Sistemas de Filtración - SPENA GROUP Tratamiento de Aguas Residuales." Accessed: Oct. 09, 2022. [Online]. Available: <https://spenagroup.com/tratamiento-primario-aguas-residuales-sistemas-filtracion/>
- [32] "TRATAMIENTO DE LODOS PARA AGUAS RESIDUALES." Accessed: Oct. 09, 2022. [Online]. Available: <https://www.nyfdecolombia.com/aguas-residuales/tratamiento-de-lodos>
- [33] "Separación Bifásica y Trifásica." Accessed: Oct. 04, 2022. [Online]. Available: <https://es.linkedin.com/pulse/separaci%C3%B3n-bif%C3%A1sica-y-trif%C3%A1sica-ang%C3%A9lica-alc%C3%A1ntara>

- [34] “DECANTACIÒN.” Accessed: Oct. 04, 2022. [Online]. Available: <https://www.equiposylaboratorio.com/portal/articulo-ampliado/decantaciOn>
- [35] “extractor de niebla | Energy Glossary.” Accessed: Oct. 09, 2022. [Online]. Available: https://glossary.slb.com/es/terms/m/mist_extractor
- [36] “Hidrofílico.” Accessed: Oct. 09, 2022. [Online]. Available: <https://www.thierry-corp.com/es-mx/plasma-knowledgebase/hidrof%C3%ADlico>
- [37] “Sustancias hidrofóbicas: Qué son y qué aplicaciones tienen.” Accessed: Oct. 09, 2022. [Online]. Available: <https://www.infinitiaresearch.com/noticias/sustancias-hidrofobicas-que-son-y-uso/>
- [38] “Barreras Oleofílicas - Codecam.” Accessed: Oct. 09, 2022. [Online]. Available: <https://codecam.com.co/producto/barreras-oleofilicas/>
- [39] “¿Qué son los hidrocarburos? | Secretaría de Energía | Gobierno | gob.mx.” Accessed: Oct. 04, 2022. [Online]. Available: <https://www.gob.mx/sener/articulos/que-son-los-hidrocarburos>
- [40] “What is Computational Fluid Dynamics (CFD)? | SimScale | SimScale.” Accessed: Oct. 04, 2022. [Online]. Available: <https://www.simscale.com/docs/simwiki/cfd-computational-fluid-dynamics/what-is-cfd-computational-fluid-dynamics/>
- [41] “CFD Meshing Methods | System Analysis Blog | Cadence.” Accessed: Oct. 13, 2023. [Online]. Available: <https://resources.system-analysis.cadence.com/blog/msa2021-cfd-meshing-methods>
- [42] “Solid Edge | Siemens | 3D Design, Simulation, Manufacturing.” Accessed: Oct. 04, 2022. [Online]. Available: <https://solidedge.siemens.com/en/>
- [43] “Download Ansys Student | Workbench-based Simulation Tools.” Accessed: Oct. 04, 2022. [Online]. Available: <https://www.ansys.com/academic/students/ansys-student>
- [44] “MATLAB - El lenguaje del cálculo técnico.” Accessed: Aug. 21, 2023. [Online]. Available: <https://la.mathworks.com/products/matlab.html>
- [45] “OpenFOAM.” Accessed: Aug. 21, 2023. [Online]. Available: <https://www.openfoam.com/>
- [46] “GitHub - ProjectPhysX/FluidX3D: The fastest and most memory efficient lattice Boltzmann CFD software, running on all GPUs via OpenCL.” Accessed: Aug. 21, 2023. [Online]. Available: <https://github.com/ProjectPhysX/FluidX3D>

- [47] "Ansys SpaceClaim | 3D CAD Modeling Software." Accessed: Oct. 13, 2023. [Online]. Available: <https://www.ansys.com/products/3d-design/ansys-spaceclaim>
- [48] "Ansys Workbench | Simulation Integration Platform." Accessed: Oct. 13, 2023. [Online]. Available: <https://www.ansys.com/products/ansys-workbench>
- [49] "Ansys Fluent | Fluid Simulation Software." Accessed: Aug. 21, 2023. [Online]. Available: <https://www.ansys.com/products/fluids/ansys-fluent>
- [50] "Course | A Hands-on Introduction to Engineering Simulations | edX." Accessed: Aug. 21, 2023. [Online]. Available: <https://learning.edx.org/course/course-v1:CornellX+ENGR2000X+1T2018/home>
- [51] "Visual Paradigm - Suite de Productividad Online." Accessed: Oct. 13, 2023. [Online]. Available: <https://online.visual-paradigm.com/es/>
- [52] "A basic guide to oil storage tanks | JDP." Accessed: Nov. 04, 2023. [Online]. Available: <https://www.jdpipes.co.uk/knowledge/storage-tanks/basic-guide-to-oil-storage-tanks.html>
- [53] "Coagulation and Flocculation Process Fundamentals 1 Coagulation and Flocculation."
- [54] Z. You, H. Xu, Y. Sun, S. Zhang, and L. Zhang, "Effective treatment of emulsified oil wastewater by the coagulation-flotation process," *RSC Adv*, vol. 8, no. 71, pp. 40639–40646, 2018, doi: 10.1039/C8RA06565A.
- [55] "Replacing Inefficient Dynamic Mixer - a Statiflo solution." Accessed: Mar. 19, 2023. [Online]. Available: <https://statiflo.com/portfolio-item/replacing-inefficient-dynamic-mixer/>
- [56] "Is the check valve installed prior to or following the outlet valve?" Accessed: Nov. 04, 2023. [Online]. Available: <https://www.linkedin.com/pulse/check-valve-installed-prior-following-outlet-bill-kuang>
- [57] "Depth for 2D problems -- CFD Online Discussion Forums." Accessed: Oct. 30, 2023. [Online]. Available: <https://www.cfd-online.com/Forums/fluent/32962-depth-2d-problems.html>
- [58] "What depth does fluent use in 2D problems? -- CFD Online Discussion Forums." Accessed: Oct. 30, 2023. [Online]. Available: <https://www.cfd-online.com/Forums/fluent/71024-what-depth-does-fluent-use-2d-problems.html>

- [59] "ANSYS FLUENT 12.0 User's Guide - 7.3.4 Velocity Inlet Boundary Conditions." Accessed: Oct. 30, 2023. [Online]. Available:
<https://www.afs.enea.it/project/neptunius/docs/fluent/html/ug/node240.htm>
- [60] "separador horizontal | Energy Glossary." Accessed: Oct. 01, 2022. [Online]. Available:
https://glossary.slb.com/es/terms/h/horizontal_separator
- [61] "separador | Energy Glossary." Accessed: Sep. 05, 2022. [Online]. Available:
<https://glossary.slb.com/es/terms/s/separator>
- [62] "3-Phase Compact Subsea Separation System | Video | Schlumberger." Accessed: Sep. 30, 2022. [Online]. Available: <https://www.slb.com/videos/3-phase>
- [63] "Gas Liquid Separator CFD Simulation, ANSYS Fluent Tutorial - MR CFD." Accessed: Nov. 10, 2022. [Online]. Available: <https://www.mr-cfd.com/shop/gas-liquid-separator-cfd-simulation-by-ansys-fluent/>
- [64] "SEPARADORES ESFÉRICOS - El gas natural es una mezcla de hidrocarburos que se encuentran en los yacimientos, bien..." Accessed: Oct. 04, 2022. [Online]. Available: <https://med.se-todo.com/himiya/3909/index.html?page=4>
- [65] "Normas de diseño para separadores de fases hidrocaburíferas by Ludwig Abrahán Sánchez Mier - Issuu." Accessed: Oct. 04, 2022. [Online]. Available:
https://issuu.com/ludwigabrahansanchezmier/docs/normas_de_dise_o_para_separadores_
- [66] "(508) Separador Bifásico Vertical - YouTube." Accessed: Oct. 04, 2022. [Online]. Available:
<https://www.youtube.com/watch?v=yXwEXE1lr4o>
- [67] "How Thick is the Oil Slick? | NOAA's Office of Response & Restoration Blog." Accessed: Dec. 24, 2023. [Online]. Available: <https://blog.response.restoration.noaa.gov/how-thick-oil-slick>
- [68] "ANSYS FLUENT 12.0 User's Guide - 6.1.3 Choosing the Appropriate Mesh Type." Accessed: Oct. 29, 2023. [Online]. Available:
<https://www.afs.enea.it/project/neptunius/docs/fluent/html/ug/node164.htm>
- [69] "Setting up: solver - MR CFD." Accessed: Nov. 01, 2023. [Online]. Available: <https://www.mr-cfd.com/setting-up-solver/>

- [70] “[CFD] Eulerian Multi-Phase Modelling - YouTube.” Accessed: Oct. 31, 2023. [Online]. Available: <https://www.youtube.com/watch?v=6BJauDTpCmo>
- [71] “ANSYS FLUENT 12.0 User’s Guide - 24.2.5 Including Body Forces.” Accessed: Nov. 02, 2023. [Online]. Available: <https://www.afs.enea.it/project/neptunius/docs/fluent/html/ug/node725.htm>
- [72] “Volume fraction cutoff -- CFD Online Discussion Forums.” Accessed: Nov. 02, 2023. [Online]. Available: <https://www.cfd-online.com/Forums/fluent-multiphase/158493-volume-fraction-cutoff.html>
- [73] “[CFD] The Courant (CFL) Number - YouTube.” Accessed: Oct. 31, 2023. [Online]. Available: <https://www.youtube.com/watch?v=WBWY46ynRk0>
- [74] “Courant Number in CFD - SimFlow.” Accessed: Nov. 02, 2023. [Online]. Available: <https://simflow.com/courant-number-in-cfd/>
- [75] B. Andersson, *Computational fluid dynamics for engineers*. Cambridge University Press, 2011.
- [76] “Sharp interface and Sharp/Dispersed interface?” Accessed: Nov. 02, 2023. [Online]. Available: <https://forum.ansys.com/forums/topic/sharp-interface-and-sharp-dispersed-interface/>
- [77] “Recent advances in Multiphase Flow Modelling | Computational Fluid Dynamics (CFD) Blog – LEAP Australia & New Zealand.” Accessed: Nov. 02, 2023. [Online]. Available: <https://www.computationalfluidynamics.com.au/a-reflection-on-recent-advances-in-multiphase-flow-modelling/>
- [78] “ANSYS FLUENT 12.0 Theory Guide - 4.4.1 Standard - Model.” Accessed: Nov. 01, 2023. [Online]. Available: <https://www.afs.enea.it/project/neptunius/docs/fluent/html/th/node58.htm>
- [79] “K-epsilon Turbulence Model | Global Settings | SimScale.” Accessed: Nov. 01, 2023. [Online]. Available: <https://www.simscale.com/docs/simulation-setup/global-settings/k-epsilon/>
- [80] “[CFD] What is the difference between y^+ and y^* ? - YouTube.” Accessed: Oct. 31, 2023. [Online]. Available: <https://www.youtube.com/watch?v=nSdVaF3JnI0>
- [81] “K-Omega Turbulence Models | Global Settings | SimScale.” Accessed: Nov. 01, 2023. [Online]. Available: <https://www.simscale.com/docs/simulation-setup/global-settings/k-omega-sst/>

- [82] F. Menter, R. Sechner, A. A. Germany GmbH Matyushenko, and S. Petersburg, "Best Practice: RANS Turbulence Modeling in Ansys CFD."
- [83] "ANSYS FLUENT 12.0 Theory Guide - 4.5 Standard and SST - Models." Accessed: Nov. 01, 2023. [Online]. Available: <https://www.afs.enea.it/project/neptunius/docs/fluent/html/th/node65.htm>
- [84] "Difference between K-epsilon and K-omega Turbulence Model." Accessed: Nov. 01, 2023. [Online]. Available: <https://forum.ansys.com/forums/topic/difference-between-k-epsilon-and-k-omega-turbulence-model/>
- [85] "[CFD] The k - omega SST Turbulence Model - YouTube." Accessed: Oct. 31, 2023. [Online]. Available: <https://www.youtube.com/watch?v=myv-ityFnS4>
- [86] "[CFD] The k - epsilon Turbulence Model - YouTube." Accessed: Oct. 31, 2023. [Online]. Available: <https://www.youtube.com/watch?v=fOB91zQ7HJU>
- [87] "ANSYS FLUENT 12.0 Theory Guide - 4.4.3 Realizable - Model." Accessed: Nov. 01, 2023. [Online]. Available: <https://www.afs.enea.it/project/neptunius/docs/fluent/html/th/node60.htm>
- [88] "ANSYS FLUENT 12.0 Theory Guide - 4.4.2 RNG - Model." Accessed: Nov. 01, 2023. [Online]. Available: <https://www.afs.enea.it/project/neptunius/docs/fluent/html/th/node59.htm>
- [89] "Direct Numerical Simulation - an overview | ScienceDirect Topics." Accessed: Nov. 01, 2023. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/direct-numerical-simulation>
- [90] "ANSYS FLUENT 12.0 Theory Guide - 4.12.3 Non-Equilibrium Wall Functions." Accessed: Nov. 01, 2023. [Online]. Available: <https://www.afs.enea.it/project/neptunius/docs/fluent/html/th/node100.htm>
- [91] "ANSYS FLUENT 12.0 Theory Guide - 4.2.1 Reynolds-Averaged Approach vs. LES." Accessed: Nov. 01, 2023. [Online]. Available: <https://www.afs.enea.it/project/neptunius/docs/fluent/html/th/node45.htm>
- [92] "ANSYS FLUENT 12.0 Theory Guide - 16.3.8 Surface Tension and Wall Adhesion." Accessed: Nov. 01, 2023. [Online]. Available: <https://www.afs.enea.it/project/neptunius/docs/fluent/html/th/node305.htm>

- [93] "ANSYS FLUENT 12.0 User's Guide - 26.13.1 Monitoring Residuals." Accessed: Sep. 12, 2023. [Online]. Available: <https://www.afs.enea.it/project/neptunius/docs/fluent/html/ug/node812.htm>
- [94] "[CFD] Residuals in CFD (Part 1) - Understanding Residuals - YouTube." Accessed: Oct. 31, 2023. [Online]. Available: <https://www.youtube.com/watch?v=v9OnNeYH4Ok>
- [95] "[CFD] Residuals in CFD (Part 2) - Scaling - YouTube." Accessed: Oct. 31, 2023. [Online]. Available: <https://www.youtube.com/watch?v=YXEISo3Zdzk>
- [96] "[CFD] Residuals in CFD (Part 4) - Global Imbalance - YouTube." Accessed: Oct. 31, 2023. [Online]. Available: <https://www.youtube.com/watch?v=3xfaM0lcRXE>
- [97] "[CFD] Residuals in CFD (Part 3) - Normalisation - YouTube." Accessed: Oct. 31, 2023. [Online]. Available: <https://www.youtube.com/watch?v=hjC7pq4wPZA>
- [98] "[CFD] The PISO Algorithm - YouTube." Accessed: Oct. 31, 2023. [Online]. Available: <https://www.youtube.com/watch?v=ahdW5TKacok>
- [99] "Simple question : Simple Vs Coupled solver -- CFD Online Discussion Forums." Accessed: Sep. 05, 2023. [Online]. Available: <https://www.cfd-online.com/Forums/fluent/184470-simple-question-simple-vs-coupled-solver.html>
- [100] "Introduction to Multiphase Flow Modeling using Ansys Fluent | Ansys Virtual Academy - YouTube." Accessed: Oct. 31, 2023. [Online]. Available: <https://www.youtube.com/watch?v=Uwu4QRmRstk>
- [101] "ANSYS FLUENT 12.0 Theory Guide - 18.4.3 Pressure-Velocity Coupling." Accessed: Nov. 02, 2023. [Online]. Available: <https://www.afs.enea.it/project/neptunius/docs/fluent/html/th/node373.htm>
- [102] "ANSYS FLUENT 12.0 Theory Guide - 18.3.1 Spatial Discretization." Accessed: Nov. 02, 2023. [Online]. Available: <https://www.afs.enea.it/project/neptunius/docs/fluent/html/th/node366.htm>
- [103] "2nd order upwind and QUICK scheme -- CFD Online Discussion Forums." Accessed: Nov. 02, 2023. [Online]. Available: <https://www.cfd-online.com/Forums/main/9404-2nd-order-upwind-quick-scheme.html>

- [104] "ANSYS FLUENT 12.0 User's Guide - 26.12.2 Adaptive Time Stepping." Accessed: Nov. 02, 2023. [Online]. Available: <https://www.afs.enea.it/project/neptunius/docs/fluent/html/ug/node808.htm>
- [105] "Transient Flow Modelling Customer Training Material," 2010.
- [106] "Time step size and max iterations per time step -- CFD Online Discussion Forums." Accessed: Nov. 02, 2023. [Online]. Available: <https://www.cfd-online.com/Forums/fluent/37373-time-step-size-max-iterations-per-time-step.html>
- [107] "¿Qué es la ecuación de Bernoulli? (artículo) | Khan Academy." Accessed: Nov. 04, 2023. [Online]. Available: <https://es.khanacademy.org/science/physics/fluids/fluid-dynamics/a/what-is-bernoullis-equation>
- [108] S. Moran, "Process Plant Layout," 2017.
- [109] R. Turton, *Analysis, synthesis, and design of chemical processes*. Prentice Hall, 2012.
- [110] "Ss304 Chain Link Spiral Wire Mesh Conveyor Belt / 1m 1.2m 1.5m Wide Metal Balance Weave Wire Mesh Belt Conveyor Mesh Belt Price - Buy Chain Spiral Conveyor Belt Conveyor Mesh Belt / Mesh Conveyor Belt / Stainless Steel Spiral Conveyor Mesh Belt,Chain Link Spiral Wire Mesh Conveyor Belt / Spiral Wire Mesh Balance Weave Conveyor Belt,Food Grade Ss304 Wire Mesh Metal Conveyor Belt / Chain Mesh Conveyor Belt / Big Weave Conveyor Belt / Balance Weave Mesh Belt Product on Alibaba.com." Accessed: Nov. 05, 2023. [Online]. Available: https://www.alibaba.com/product-detail/SS304-chain-link-spiral-wire-mesh_62026137900.html?spm=a2700.7724857.0.0.4e686687AGlutu
- [111] "Amazon.com: Membrane Solutions Filtro de agua plisado de 20 micrones para el hogar, 10 x 4.5 pulgadas, cartucho de repuesto de sedimentos resistente para toda la casa, compatible con ECP10-1, ECP20-BB, R50-BBSA, FXHSC, CB1-SED10-BB (paquete de 4) : Herramientas y Mejoras del Hogar." Accessed: Nov. 05, 2023. [Online]. Available: https://www.amazon.com/Membrane-Solutions-Replacement-Compatiable-CB1-SED10-BB/dp/B082WRG6YR/ref=sr_1_3_sspa?keywords=ro+membrane&qid=1698000667&sr=8-3-spons&sp_csd=d2lkZ2V0TmFtZT1zcf9hdGY&psc=1
- [112] "Acero inoxidable 4000L 48000 litros 9500 Galones semi remolque cisterna de combustible y tanques de combustible - China El depósito de combustible semi remolque cisterna de

- combustible, camión cisterna.” Accessed: Nov. 05, 2023. [Online]. Available: https://es.made-in-china.com/co_jindatrailer/product_Stainless-Steel-40000L-48000-Liters-9500-Gallons-Semi-Trailer-Fuel-Tanks-Fuel-Tanker_ehuyghnhy.html
- [113] “Wellhead Equipment Two Phase Test Separator Horizontal Production Separator - Buy Horizontal Production Separator, Wellhead Equipment, Two Phase Test Separator Product on Alibaba.com.” Accessed: Nov. 05, 2023. [Online]. Available: https://www.alibaba.com/product-detail/Wellhead-equipment-two-phase-test-separator_60641649021.html?spm=a2700.7724857.0.0.230d4b8dze9MTh
- [114] “Digital Valve at Rs 10000/piece | Navipeth | Pune | ID: 9836545262.” Accessed: Nov. 05, 2023. [Online]. Available: <https://www.indiamart.com/proddetail/digital-valve-9836545262.html>
- [115] “Industrial Electric Vertical Inline Centrifugal Water Pump for Municipal Water Supply and Drainage - China Vertical Inline Pump and Water Pump.” Accessed: Nov. 05, 2023. [Online]. Available: <https://leohnpump.en.made-in-china.com/product/vZPauQsGrCVw/China-Industrial-Electric-Vertical-Inline-Centrifugal-Water-Pump-for-Municipal-Water-Supply-and-Drainage.html>
- [116] “Outer Rotor Axial Flow Fan with Diameter 200-630 mm - China Industrial Fan and Ventilation Fan.” Accessed: Nov. 05, 2023. [Online]. Available: <https://hzcthardware.en.made-in-china.com/product/zJxrnQpMNmRP/China-Outer-Rotor-Axial-Flow-Fan-with-Diameter-200-630-mm.html>
- [117] D. : Elkyn and R. L. Arias, “INDICADORES DE BONDAD FINANCIERA.”
- [118] “Catana 62 barco nuevo en Girona - Top Barcos.” Accessed: Nov. 15, 2023. [Online]. Available: <https://www.topbarcos.com/oferta-barcos-nuevos/catana-62>
- [119] “Eye-Opening Facts About the Cost of Boat Gas | J.D. Power.” Accessed: Nov. 15, 2023. [Online]. Available: <https://www.jdpower.com/boats/shopping-guides/how-much-does-boat-gas-cost>
- [120] “Average Salary By State In 2023 – Forbes Advisor.” Accessed: Dec. 24, 2023. [Online]. Available: <https://www.forbes.com/advisor/business/average-salary-by-state/>
- [121] “Así se paga el deducible dentro de una póliza de responsabilidad extracontractual | Ámbito Jurídico.” Accessed: Oct. 29, 2023. [Online]. Available:

<https://www.ambitojuridico.com/noticias/general/administracion-publica/asi-se-paga-el-deducible-dentro-de-una-poliza-de>

- [122] “¿Qué es el deducible en un seguro de auto? | Blog Comparabien.” Accessed: Oct. 29, 2023. [Online]. Available: <https://comparabien.com.co/blog-consejos/que-deducible-seguro-auto>
- [123] “¿Cómo funciona el deducible de su seguro? | III.” Accessed: Oct. 29, 2023. [Online]. Available: <https://www.iii.org/es/article/como-funciona-el-deducible-de-su-seguro>
- [124] “Seguro de hogar individual | BBVA Colombia.” Accessed: Oct. 29, 2023. [Online]. Available: <https://www.bbva.com.co/personas/productos/seguros/libres/hogar-individual.html>
- [125] “What Is a Homeowners Insurance Deductible? | Bankrate.” Accessed: Oct. 29, 2023. [Online]. Available: <https://www.bankrate.com/insurance/homeowners-insurance/home-insurance-deductible/>
- [126] “Cica Life - Citizens Inc.” Accessed: Oct. 29, 2023. [Online]. Available: <https://www.citizensinc.com/cica-life/>
- [127] “ANNUITY MAX V I V E T U V I D A A L M Á X I M O.”
- [128] “Average Salary by State In (2023) – Forbes Advisor.” Accessed: Oct. 29, 2023. [Online]. Available: https://www.forbes.com/advisor/business/average-salary-by-state/#average_salary_by_state_in_the_u_s_section
- [129] “Income in the United States: 2022.” Accessed: Oct. 29, 2023. [Online]. Available: <https://www.census.gov/library/publications/2023/demo/p60-279.html>
- [130] “Are You Well-Paid? Compare Your Salary to the Average U.S. Income | The Motley Fool.” Accessed: Oct. 29, 2023. [Online]. Available: <https://www.fool.com/the-ascent/research/average-us-income/>
- [131] “15 Jobs That Pay \$75K a Year | Indeed.com.” Accessed: Oct. 29, 2023. [Online]. Available: <https://www.indeed.com/career-advice/finding-a-job/jobs-that-pay-75k-a-year>
- [132] “Plataformas petrolíferas en el mundo por operador | Statista.” Accessed: Oct. 29, 2023. [Online]. Available: <https://es.statista.com/estadisticas/636003/numero-total-de-plataformas-petroliferas-en-alta-mar-por-operador/>

- [133] "Pemex: total assets 2022 | Statista." Accessed: Oct. 29, 2023. [Online]. Available: <https://www.statista.com/statistics/539542/total-asseets-of-pemex/>
- [134] "Shell (SHEL) Market Cap & Net Worth - Stock Analysis." Accessed: Oct. 29, 2023. [Online]. Available: <https://stockanalysis.com/stocks/shel/market-cap/>
- [135] "Chevron (CVX) Market Cap & Net Worth - Stock Analysis." Accessed: Oct. 29, 2023. [Online]. Available: <https://stockanalysis.com/stocks/cvx/market-cap/>
- [136] "Clean Water Act (CWA) | Bureau of Ocean Energy Management." Accessed: Oct. 29, 2023. [Online]. Available: <https://www.boem.gov/environment/environmental-assessment/clean-water-act-cwa>
- [137] "Special report: Civil fine in Gulf spill could be \$4,300 barrel | Reuters." Accessed: Oct. 29, 2023. [Online]. Available: <https://www.reuters.com/article/us-oil-rig-civil-fines-idUKTRE64O75Q20100526>

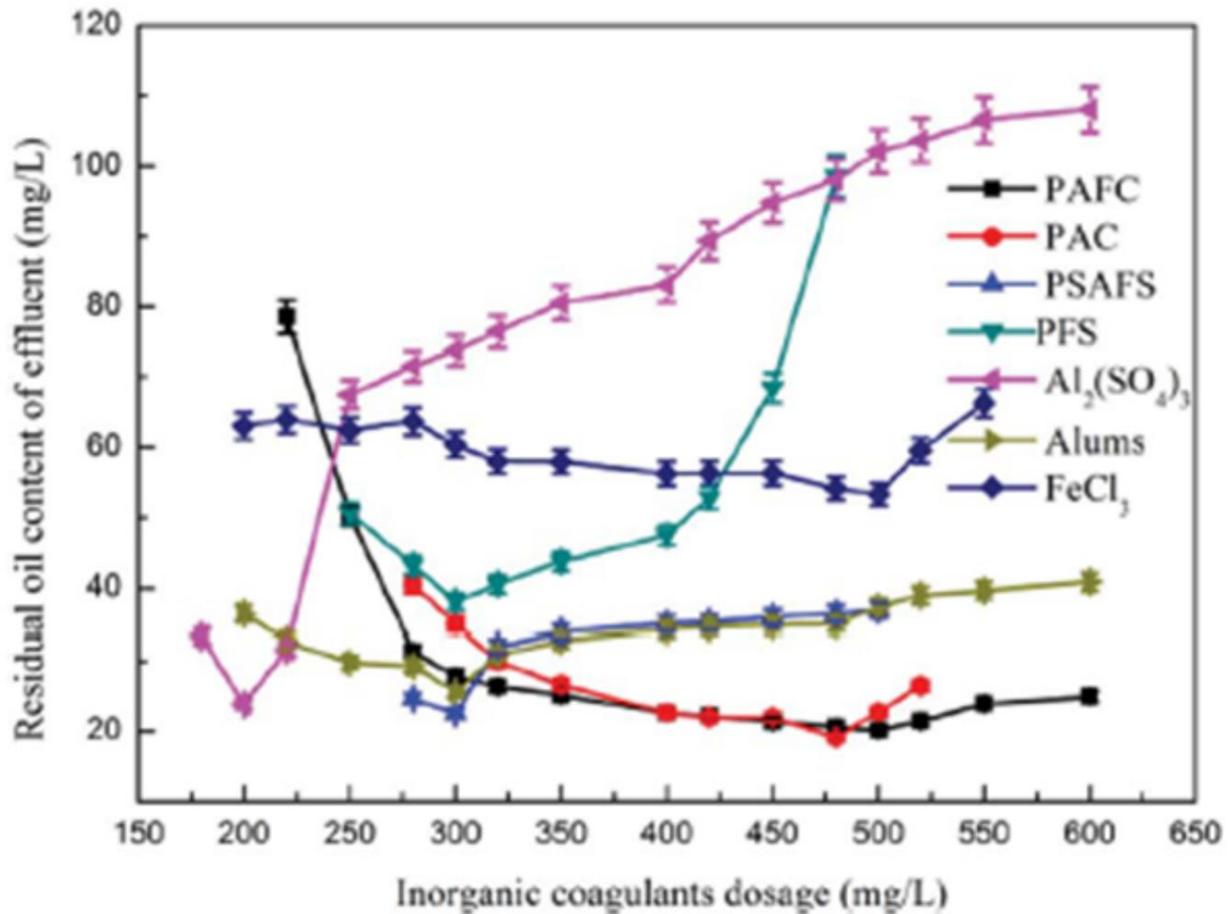
ANEXOS

ANEXO 1

DISEÑO DE PROCESO

Figura 74.

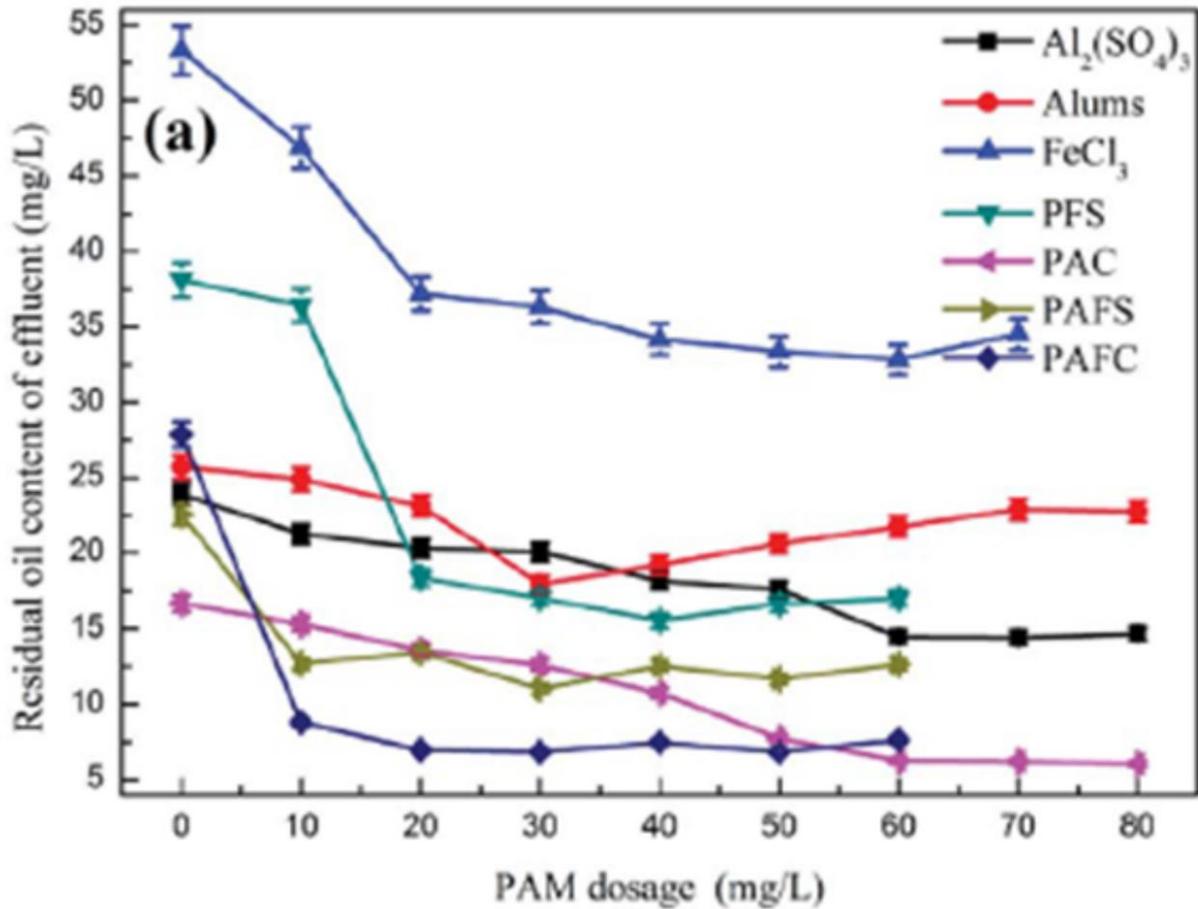
Gráficas de selección de coagulante/floculante – Parte 1.



Nota. Eje y: menor es mejor; Eje x: menor es mejor. PAC es elegido por los investigadores. Tomado de: Effective treatment of emulsified oil wastewater by the coagulation–flotation process [En línea]. Disponible: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC9091706/> [accedido: mar.10.2023].

Figura 75.

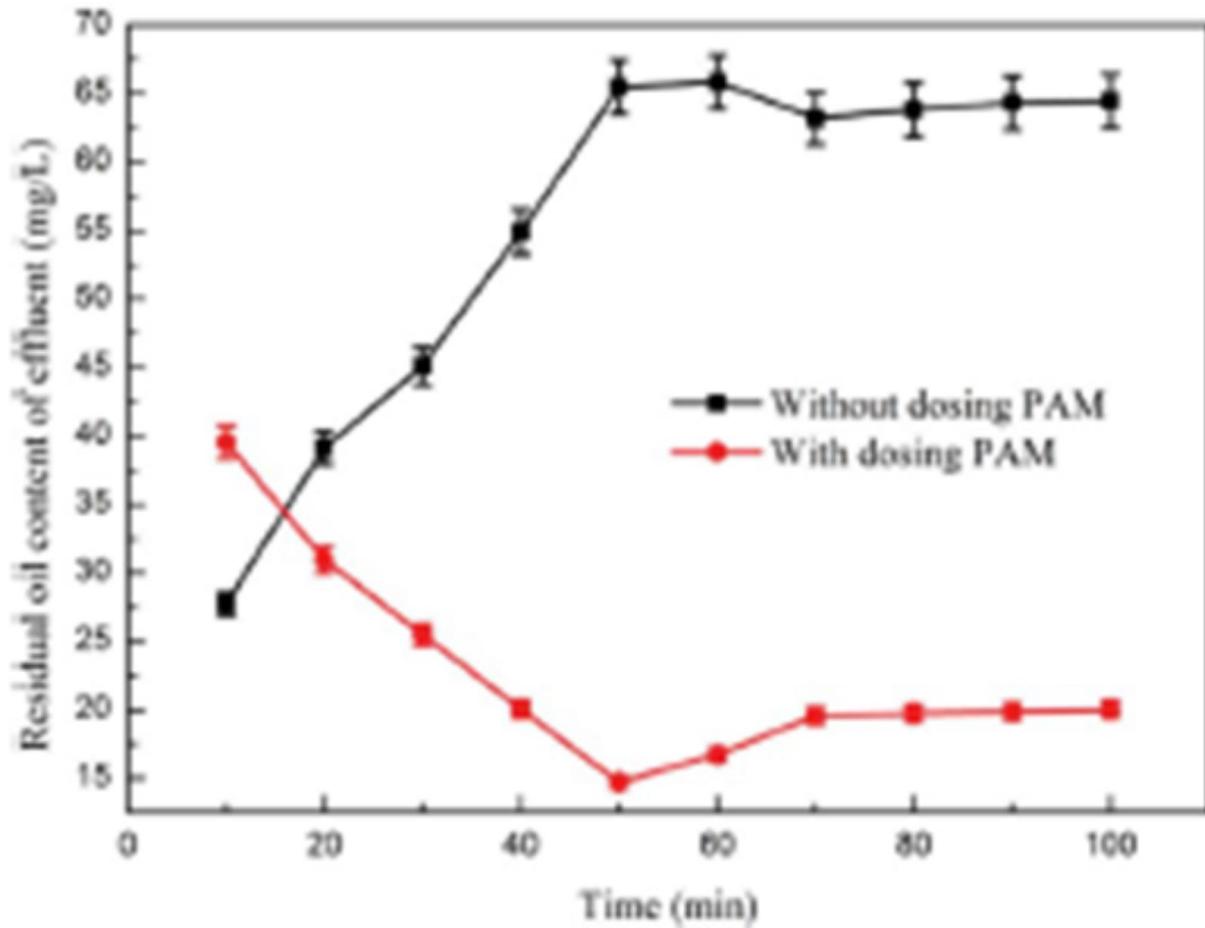
Gráficas de selección de coagulante/floculante – Parte 2.



Nota. Eje y: menor es mejor; Eje x: menor es mejor. PAC es elegido por los investigadores. Tomado de: Effective treatment of emulsified oil wastewater by the coagulation–flotation process [En línea]. Disponible: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC9091706/> [accedido: mar.10.2023].

Figura 76.

Gráficas de selección de coagulante/floculante – Parte 3.



Nota. Eje y: menor es mejor; Eje x: menor es mejor para este proyecto. PAM es el floculante agregado por los investigadores. Tomado de: Effective treatment of emulsified oil wastewater by the coagulation–flotation process [En línea]. Disponible: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC9091706/> [accedido: mar.10.2023].

PFD – Versión 1

Ver plano en: Anexo 1 – PFD V1.

PFD – Versión 2

Ver plano en: Anexo 1 – PFD V2.

PFD – Versión 3

Ver plano en: Anexo 1 – PFD V3.

PFD – Versión 4

Ver plano en: Anexo 1 – PFD V4.

PFD – Versión 5

Ver plano en: Anexo 1 – PFD V5.

Figura 77.

Condiciones del balance de masa.

Cada equipo tiene un vent de gas para lo que se pueda llegar a evaporar del oil
 Cada equipo pierde una parte pequeña del oil entrante que se transforma en gas
 El balance final de oil debe sumar lo que se transforma en gas

Sólidos =	0.005 kg/m3	de fluido líquido
Gas =	0.001 m3/m3	susceptible a

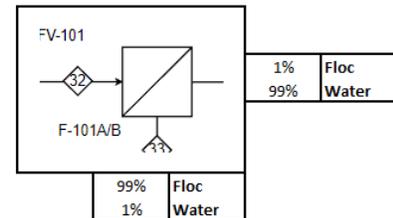
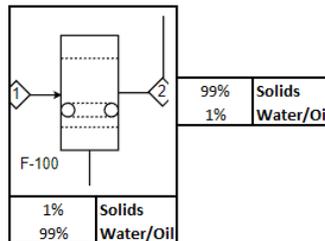
*El balance se hará con 5% oil

*Velocidad = 1 m/s

*Esta es la composición de entrada a cada separador

*El valor de Gas es imposible de definir correctamente, por ello se definirá un % fijo que sale por el vent en cada ocasión, sin importar cuánto esté entrando al

kg/s	kg/s	kg/m3	kg/m3
Masa oil	Masa wt	dens oil	dens wt
8.46	189.658	846	998.2



Eficiencia Oil (1 m/s, 5% oil) =	96.24%
Eficiencia Water (1 m/s, 5% oil) =	99.97%
NRZ 1 (% perdido) (1 m/s, 5% oil) =	1.15%
NRZ 2 (% perdido) (1 m/s, 5% oil) =	2.61%

Nota. Entendiendo que el flujo másico está constantemente dependiendo de la velocidad del barco y otros factores, el balance de masa cambia constantemente, los valores en la figura son la simplificación de algunos de esos factores.

Tabla 22.

Balance de masa.

<i>Número de corriente</i>	<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>
<i>Temperature (°C)</i>	10	10	10	10	10
<i>Volume flowrate (m3/h)</i>	2,912.00	29.12	0.03	0.03	29.09
<i>Mass flowrate (kg/h)</i>	14.55	14.40	0.00	0.00	14.40
<i>Individual component flowrates</i>					
Seawater (m3/h)	2,763.64	27.64	-	-	27.64
Oil (m3/h)	145.45	1.45	-	-	1.45
Gas (m3/h)	2.91	0.03	0.03	0.03	-
Solids (kg/h)	14.55	14.40	-	-	14.40
Coagulant (PAC) (kg/h)	-	-	-	-	-
Floculant (PAM) (kg/h)	-	-	-	-	-

<i>6</i>	<i>7</i>	<i>8</i>	<i>9</i>	<i>10</i>	<i>11</i>	<i>12</i>	<i>13</i>	<i>14</i>
10	10	10	10	10	10	10	10	10
2,882.88	2,882.88	2,882.88	0.58	720.58	720.58	720.58	720.58	720.58
0.15	0.15	0.15	0.00	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04
2,736.00	2,736.00	2,736.00	-	684.00	684.00	684.00	684.00	684.00
144.00	144.00	144.00	-	36.00	36.00	36.00	36.00	36.00
2.88	2.88	2.88	0.58	0.58	0.58	0.58	0.58	0.58
0.15	0.15	0.15	-	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04
-	-	-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-	-	-

<i>15</i>	<i>16</i>	<i>17</i>	<i>18</i>	<i>19</i>	<i>20</i>	<i>21</i>	<i>22</i>	<i>23</i>
10	10	10	10	10	10	10	10	10
720.58	720.58	720.58	720.58	720.58	720.58	720.58	0.19	0.19
0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.00	0.00

684.00	684.00	684.00	684.00	684.00	684.00	684.00	-	-
36.00	36.00	36.00	36.00	36.00	36.00	36.00	-	-
0.58	0.58	0.58	0.58	0.58	0.58	0.58	0.19	0.19
0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	-	-
-	-	-	-	-	-	-	-	-

- - - - - - - - -

24	25	26	27	28	29	30	31	32
10	10	10	10	10	10	10	10	10
0.20	0.58	0.58	34.85	34.85	34.85	0.00	342.42	308.74
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01

-	-	-	0.21	0.21	0.21	-	342.00	307.80
-	-	-	34.65	34.65	34.65	-	0.42	0.94
0.20	0.58	0.58	-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-	0.01	0.01
-	-	-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-	-	-

33	34	35	36	37	38	39	40	41
10	10	10	10	10	10	10	10	10
33.99	685.15	685.15	685.15	0.19	0.19	0.19	0.57	0.57
0.01	0.04	0.04	0.04	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

33.99	683.79	683.79	683.79	-	-	-	-	-
-	1.35	1.35	1.35	-	-	-	-	-
-	-	-	-	0.19	0.19	0.19	0.57	0.57
0.01	0.04	0.04	0.04	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-	-	-

42	43	44	45	46	47	48	49	50
10	10	10	10	10	10	10	10	10
34.85	34.85	34.85	0.00	342.42	308.74	33.99	685.15	685.15
0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.01	0.04	0.04

0.21	0.21	0.21	-	342.00	307.80	33.99	683.79	683.79
34.65	34.65	34.65	-	0.42	0.94	-	1.35	1.35
-	-	-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	0.01	0.01	0.01	0.04	0.04
-	-	-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-	-	-

<i>51</i>	<i>52</i>	<i>53</i>	<i>54</i>	<i>55</i>	<i>56</i>	<i>57</i>	<i>58</i>	<i>59</i>
10	10	10	10	10	10	10	10	10
685.15	0.19	0.19	0.19	0.57	0.57	34.85	34.85	34.85
0.04	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

683.79	-	-	-	-	-	0.21	0.21	0.21
1.35	-	-	-	-	-	34.65	34.65	34.65
-	0.19	0.19	0.19	0.57	0.57	-	-	-
0.04	-	-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-	-	-

<i>60</i>	<i>61</i>	<i>62</i>	<i>63</i>	<i>64</i>	<i>65</i>	<i>66</i>	<i>67</i>	<i>68</i>
10	10	10	10	10	10	10	10	10
0.00	342.42	308.74	33.99	685.15	685.15	685.15	0.19	0.19
0.00	0.01	0.01	0.01	0.04	0.04	0.04	0.00	0.00

-	342.00	307.80	33.99	683.79	683.79	683.79	-	-
-	0.42	0.94	-	1.35	1.35	1.35	-	-
-	-	-	-	-	-	-	0.19	0.19
-	0.01	0.01	0.01	0.04	0.04	0.04	-	-
-	-	-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-	-	-

<i>69</i>	<i>70</i>	<i>71</i>	<i>72</i>	<i>73</i>	<i>74</i>	<i>75</i>	<i>76</i>	<i>77</i>
10	10	10	10	10	10	10	10	10
0.19	0.57	0.57	34.85	34.85	34.85	0.00	342.42	308.74
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01

-	-	-	0.21	0.21	0.21	-	342.00	307.80
-	-	-	34.65	34.65	34.65	-	0.42	0.94
0.19	0.57	0.57	-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-	0.01	0.01
-	-	-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-	-	-

<i>78</i>	<i>79</i>	<i>80</i>	<i>81</i>	<i>82</i>	<i>83</i>	<i>84</i>	<i>85</i>	<i>86</i>
-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------

10	10	10	10	10	10	10	10	10
33.99	685.15	685.15	685.15	0.00	0.00	139.42	139.42	139.42
0.01	0.04	0.04	0.04	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
33.99	683.79	683.79	683.79	-	-	0.84	0.84	0.84
-	1.35	1.35	1.35	-	-	138.58	138.58	138.58
-	-	-	-	-	-	0.00	0.00	0.00
0.01	0.04	0.04	0.04	-	-	0.00	0.00	0.00
-	-	-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-	-	-

87	88	89	90	91	92	93	94	95
10	10	10	10	10	10	10	10	10
139.42	2,740.58	2,740.58	2,740.58	0.00	0.00	0.00	0.00	2,740.58
0.00	0.15	0.15	0.15	0.00	133.33	133.33	133.33	133.47
0.84	2,735.16	2,735.16	2,735.16	-	-	-	-	2,735.16
138.58	5.42	5.42	5.42	-	-	-	-	5.42
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	-	-	-	0.00
0.00	0.15	0.15	0.15	-	-	-	-	0.15
-	-	-	-	-	113.81	113.81	113.81	113.81
-	-	-	-	-	19.51	19.51	19.51	19.51

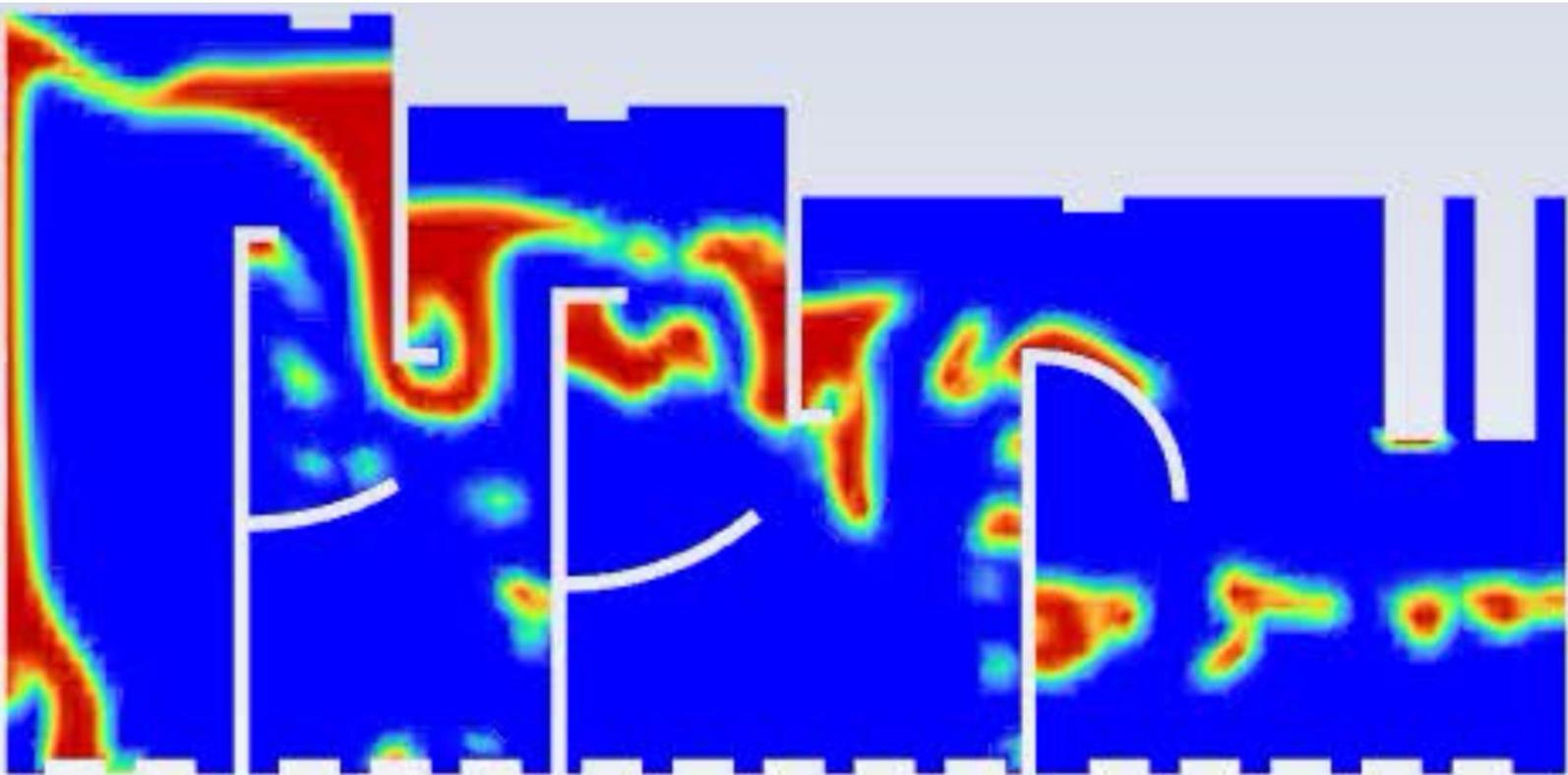
96	97	98	99	100	101	102	103
10	10	10	10	10	10	10	10
0.00	0.00	0.00	2,740.58	2,740.58	32.72	2,707.87	2,707.87
0.00	0.00	0.00	133.47	133.47	131.99	1.48	1.48
-	-	-	2,735.16	2,735.16	27.35	2,707.81	2,707.81
-	-	-	5.42	5.42	5.37	0.05	0.05
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	-	-	-
-	-	-	0.15	0.15	-	0.15	0.15
-	-	-	113.81	113.81	112.68	1.14	1.14
-	-	-	19.51	19.51	19.32	0.20	0.20

Nota. Las 103 corrientes corresponden a la última versión del PFD (versión 5), se puede visualizar en: Anexo 1 – PFD V5.

ANEXO 2
DISEÑO DE EQUIPO

Figura 78.

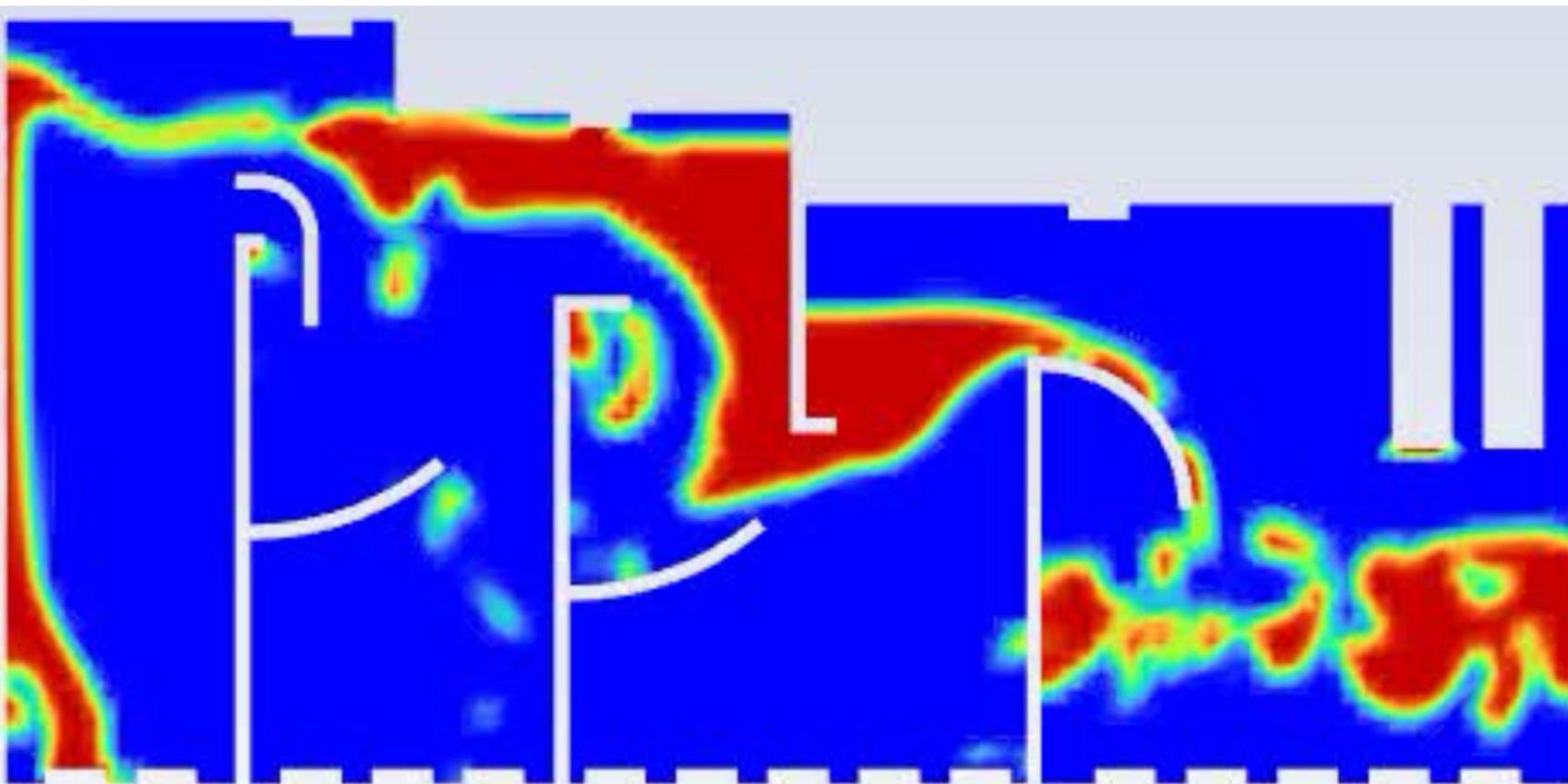
Evolución del diseño – Diseño 2.



Nota. Rojo es *oil*; en general azul debajo del *oil* es agua, y azul encima es aire, verde/amarillo es la zona de la interfaz.

Figura 79.

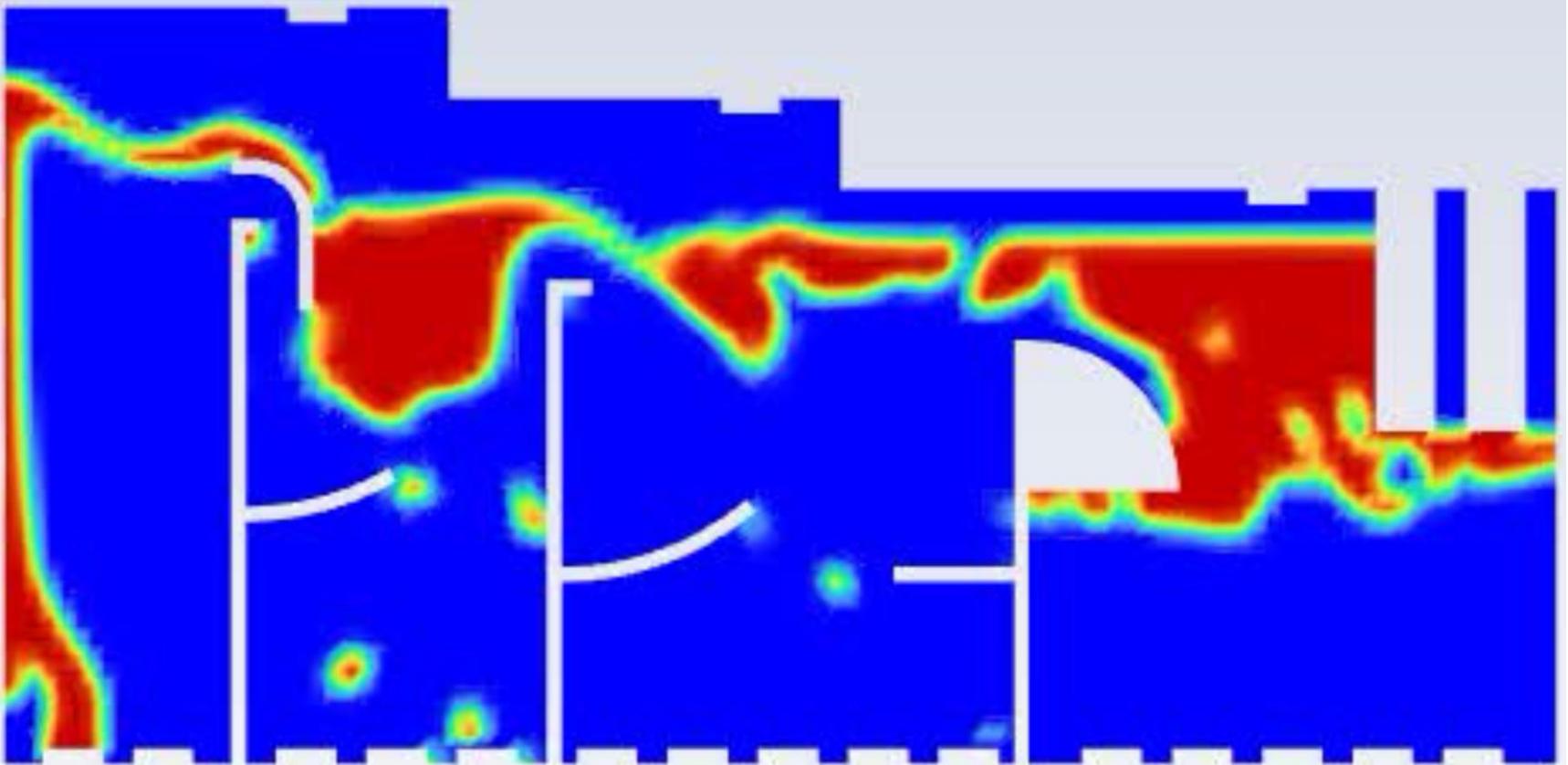
Evolución del diseño – Diseño 3.



Nota. Rojo es *oil*; en general azul debajo del *oil* es agua, y azul encima es aire, verde/amarillo es la zona de la interfaz.

Figura 80.

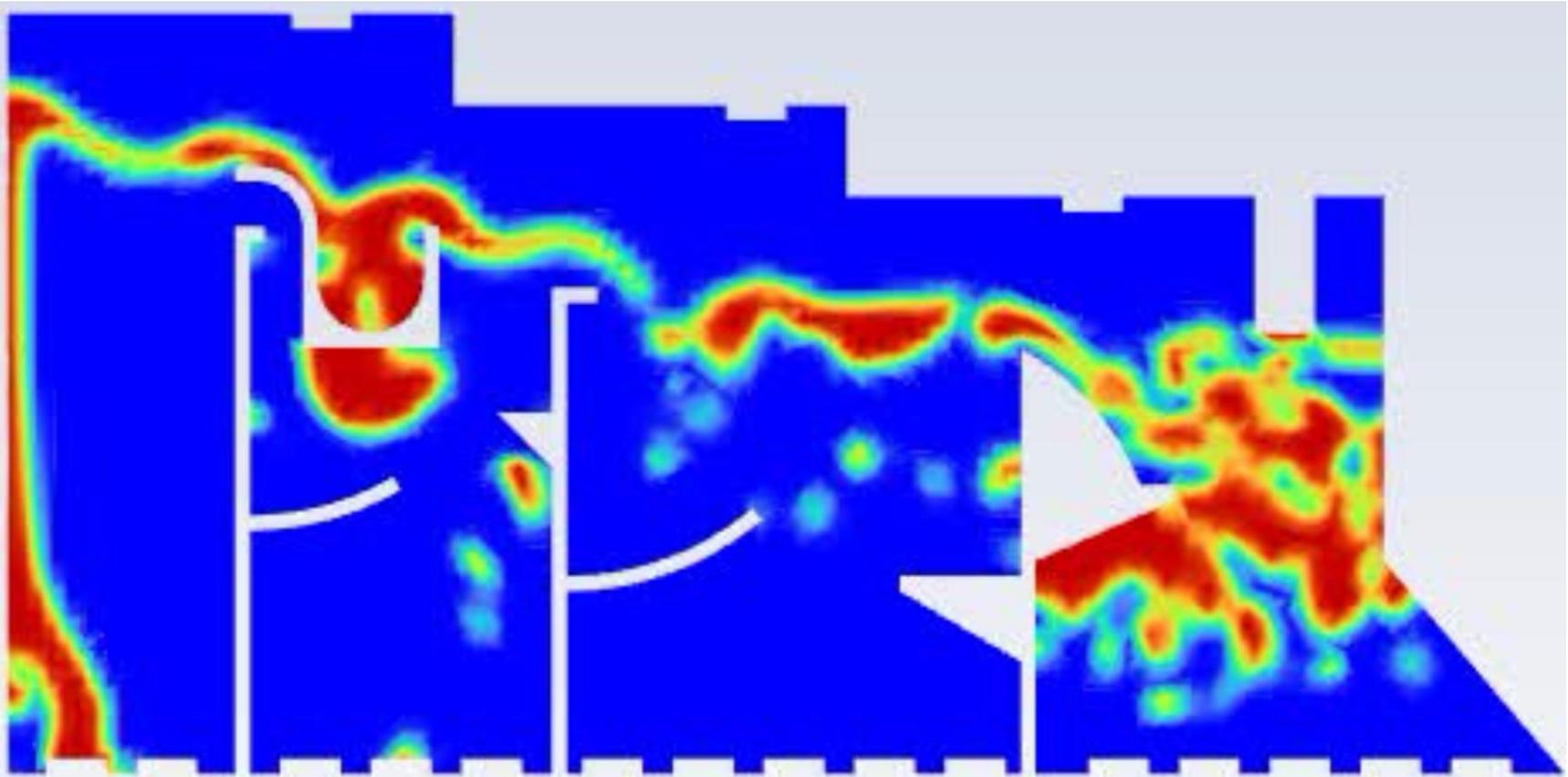
Evolución del diseño – Diseño 4.



Nota. Rojo es *oil*; en general azul debajo del *oil* es agua, y azul encima es aire, verde/amarillo es la zona de la interfaz.

Figura 81.

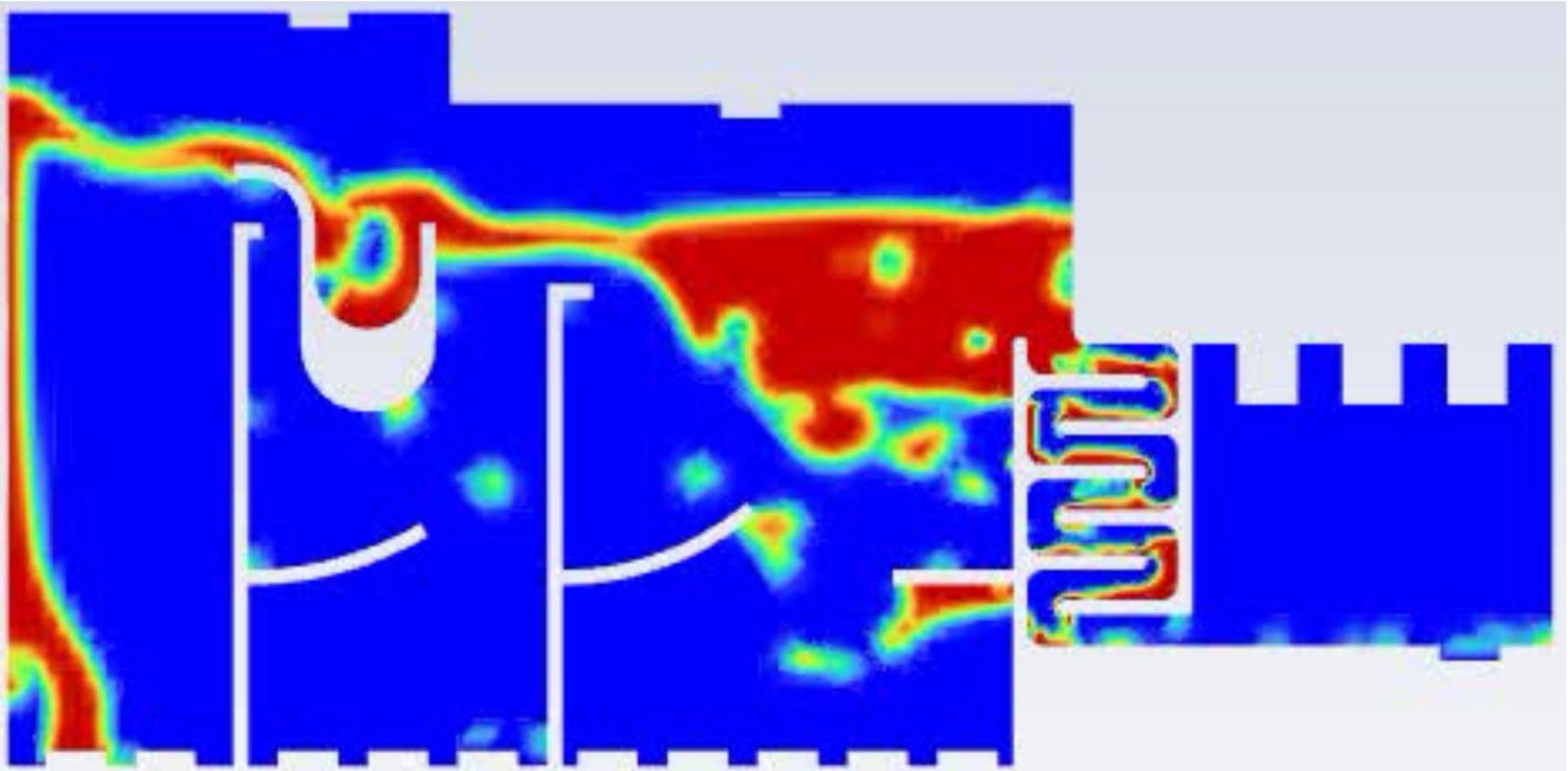
Evolución del diseño – Diseño 5.



Nota. Rojo es *oil*; en general azul debajo del *oil* es agua, y azul encima es aire, verde/amarillo es la zona de la interfaz.

Figura 82.

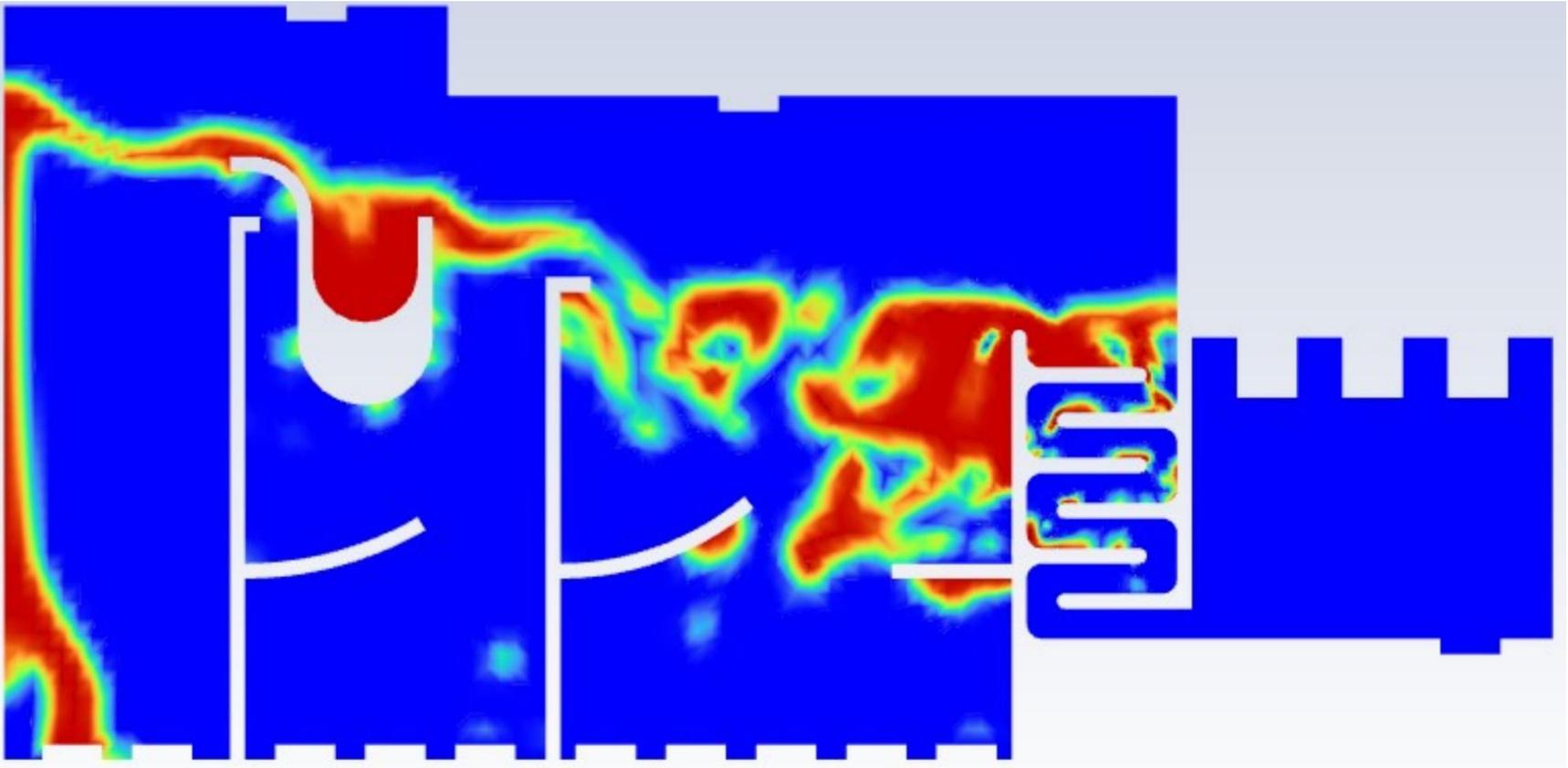
Evolución del diseño – Diseño 6.



Nota. Rojo es *oil*; en general azul debajo del *oil* es agua, y azul encima es aire, verde/amarillo es la zona de la interfaz. En la última sección azul es puramente aire.

Figura 83.

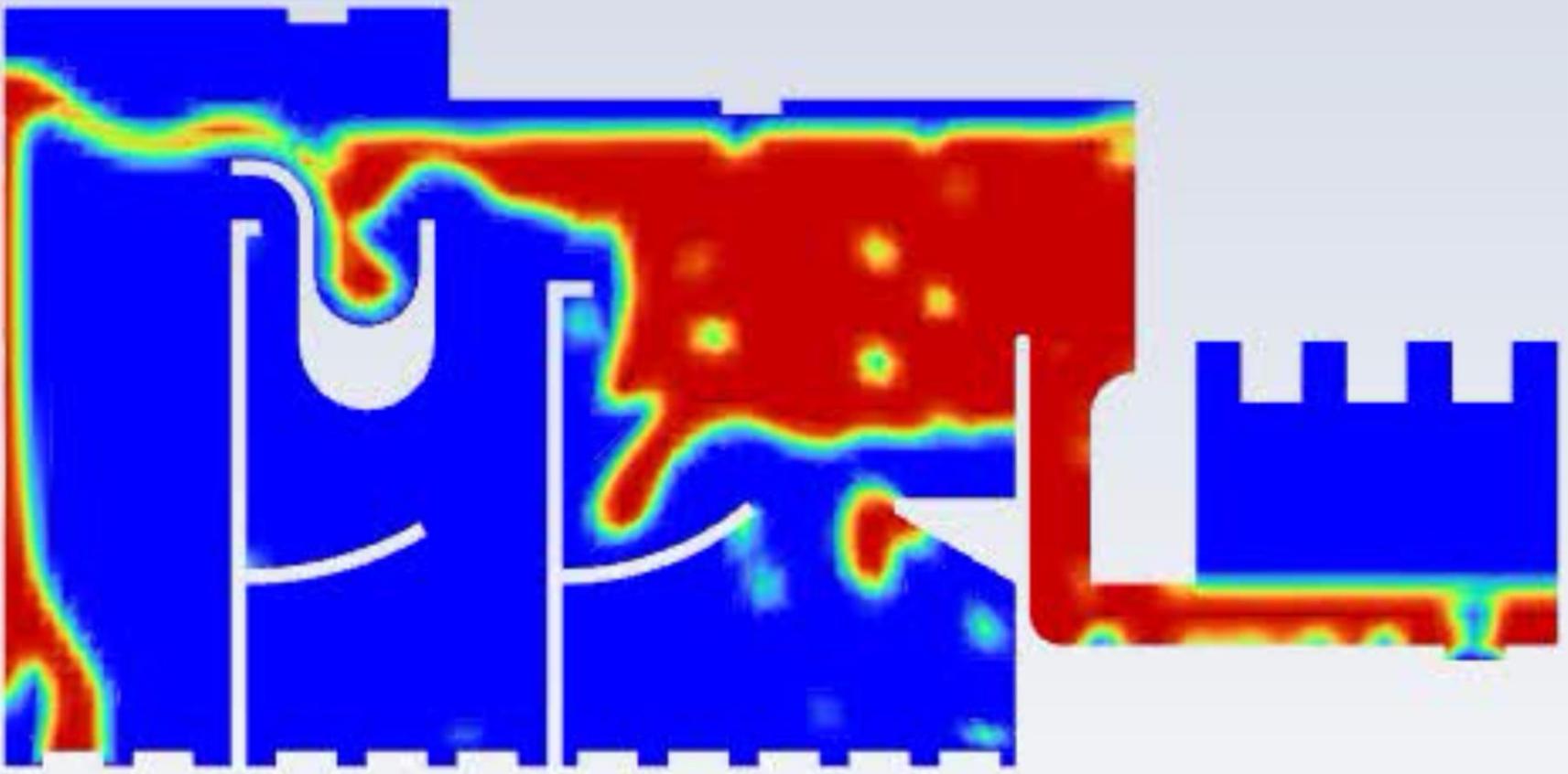
Evolución del diseño – Diseño 7.



Nota. Rojo es *oil*; en general azul debajo del *oil* es agua, y azul encima es aire, verde/amarillo es la zona de la interfaz. En la última sección azul es puramente aire.

Figura 84.

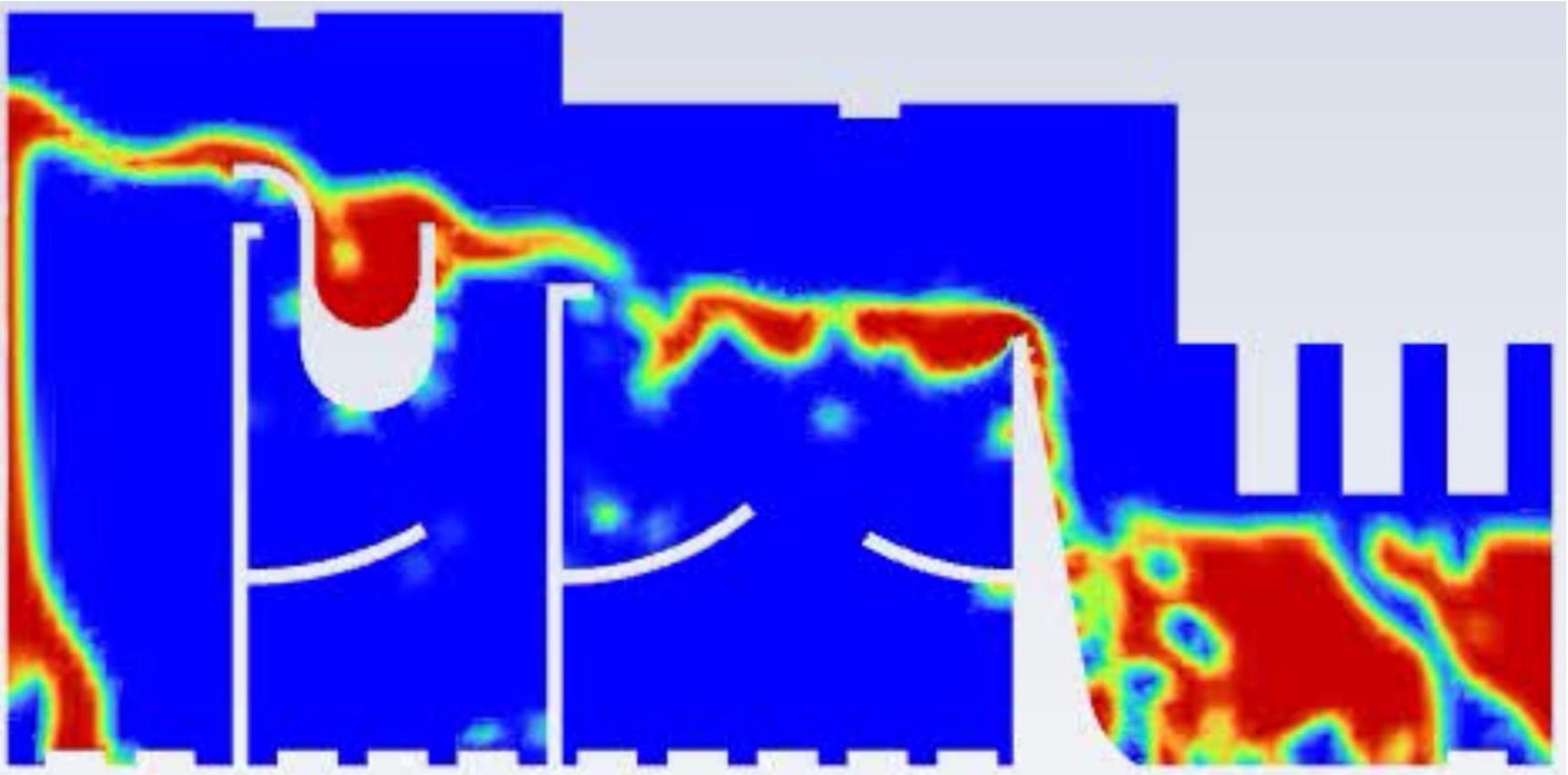
Evolución del diseño – Diseño 8.



Nota. Rojo es *oil*; en general azul debajo del *oil* es agua, y azul encima es aire, verde/amarillo es la zona de la interfaz. En la última sección azul es puramente aire.

Figura 85.

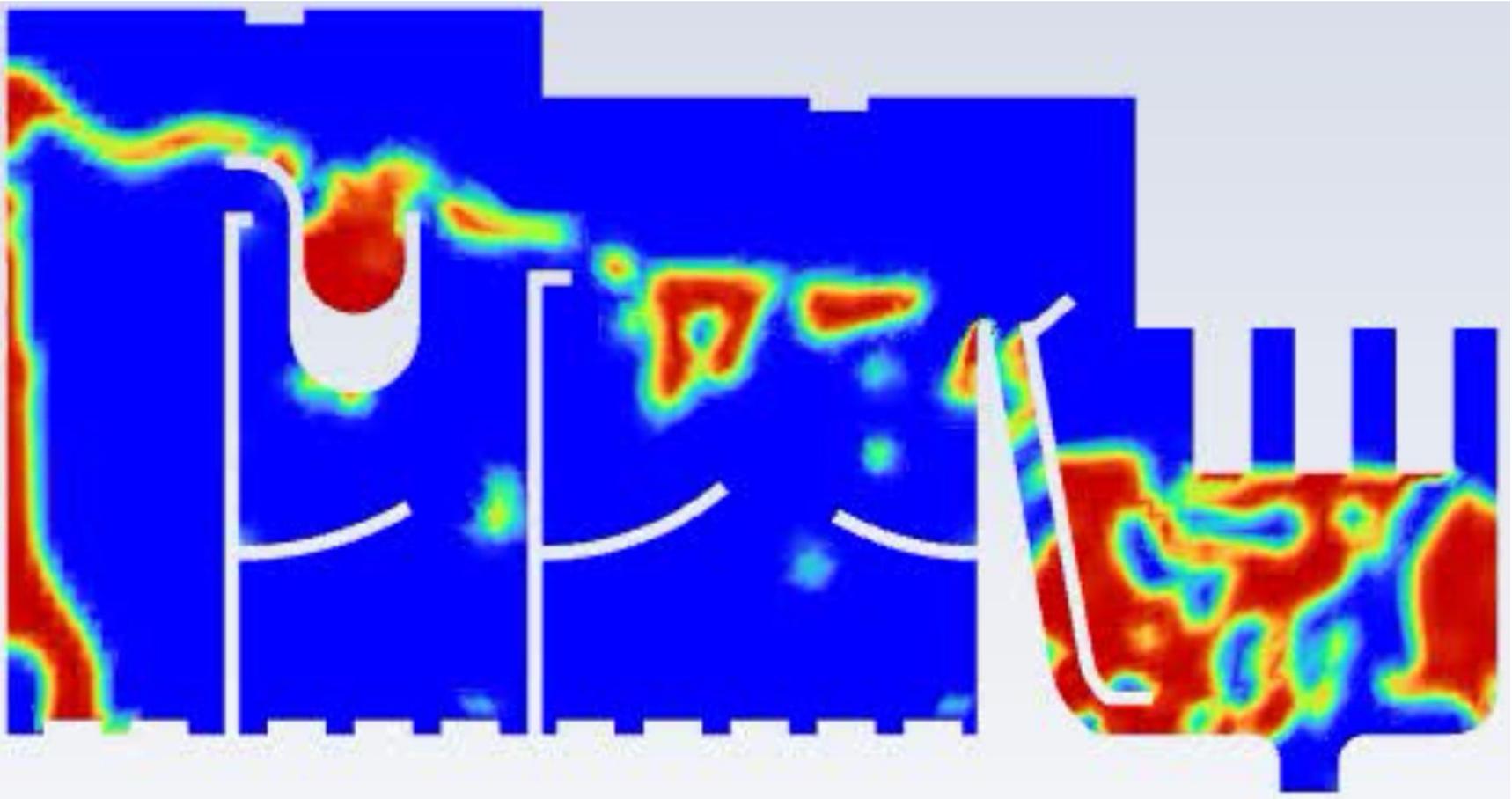
Evolución del diseño – Diseño 9.



Nota. Rojo es *oil*; en general azul debajo del *oil* es agua, y azul encima es aire, verde/amarillo es la zona de la interfaz. En la última sección, la columna azul es agua.

Figura 86.

Evolución del diseño – Diseño 10.



Nota. Rojo es *oil*; en general azul debajo del *oil* es agua, y azul encima es aire, verde/amarillo es la zona de la interfaz. En la última sección, la columna azul es agua, mientras que las burbujas son combinación de aire/agua.

Figura 87.

Escenarios: Código de Python (Parte 1).

```
import numpy as np
import pandas as pd

[ ] from google.colab import drive
drive.mount('/content/drive')

[ ] NRZ1 = "nrz-1-rfile.out"
NRZ2 = "nrz-2-rfile.out"
OILIN = "oil-in-rfile.out"
file_path = f'/content/drive/MyDrive/Tesis/{NRZ2}'
with open(file_path, 'r') as out_file:
    file_lines = out_file.readlines()

[ ] print(file_lines)

Dataframe columns names:

[ ] iter_col = file_lines[2].split('')[1]
print(iter_col)

[ ] nrz_col = file_lines[2].split('')[3]
print(nrz_col)

[ ] time_col = file_lines[2].split('')[5]
print(time_col)
```

Nota. Establece las librerías, extrae la información de una carpeta y crea las columnas del *dataframe*.

Figura 88.

Escenarios: Código de Python (Parte 2).

```
Lists of data from each column:

[ ] iteration_list = []
    for i, numbers in enumerate(file_lines):
        if i == 0 or i == 1 or i == 2:
            continue
        iteration = int(file_lines[i].split()[0])
        iteration_list.append(iteration)
    print(iteration_list)

[ ] nrz_list = []
    for i, numbers in enumerate(file_lines):
        if i == 0 or i == 1 or i == 2:
            continue
        nrz = float(file_lines[i].split()[1])
        nrz_list.append(nrz)
    print(nrz_list)

[ ] time_list = []
    for i, numbers in enumerate(file_lines):
        if i == 0 or i == 1 or i == 2:
            continue
        time = float(file_lines[i].split()[2])
        time_list.append(time)
    print(time_list)

[ ] df = pd.DataFrame({iter_col: iteration_list, nrz_col: nrz_list, time_col: time_list})
    print(df)
```

Nota. Se usa la información NRZ para crear listas de cada variable (iteración, valor NRZ, *time stamp*), y se crea un *dataframe* con ellas.

Figura 89.

Escenarios: Código de Python (Parte 3).

```
[ ] def find_missing_number(numbers):
    for i in range(len(numbers) - 1):
        if numbers[i+1] != numbers[i] + 1:
            return numbers[i] + 1

    return None # No missing number found

# Example usage
missing_number = find_missing_number(df[iter_col])
print("Missing number:", missing_number)

[ ] mass_list = []
previous_time = 0
for i in df[iter_col]:
    current_time = df[time_col][i]
    time_step_mass = df[nrz_col][i] * (current_time - previous_time)
    mass_list.append(time_step_mass)
    previous_time = current_time

[ ] diesel_lost = sum(mass_list)
print(f"La cantidad perdida en la duración de la sim es de: {diesel_lost} kg")

La cantidad perdida en la duración de la sim es de: -109.79909949469707 kg

[ ] diesel_lost_flux = diesel_lost/df[time_col][len(mass_list)-1]
print(f"El flujo de pérdida promedio es de {diesel_lost_flux} kg/s")

El flujo de pérdida promedio es de -1.0979909949469708 kg/s
```

Nota. Encargada de calcular la pérdida, la cual lo logra haciendo una sumatoria (de miles o decenas de miles) de valores.

Tabla 23.*Escenarios – PRE SIM.*

Escenarios	PRE SIM							
	INLET					OUTLET		
	Velocidad (m/s)	% Oil	Masa Oil (kg/s)	Masa Water (kg/s)	Masa Total (kg/s)	Outlet 1 (kg/s)	Outlet 2 (kg/s)	Outlet 3 (kg/s)
1	0.5	30%	25.380	69.874	95.254	34.937	31.4433	3.4937
2	0.5	20%	16.92	79.856	96.776	39.9855	35.9352	3.9928
3	0.5	10%	8.46	89.838	98.298	44.9478	40.4550	4.4919
4	0.5	5%	4.23	94.829	99.059	47.4145	42.6731	4.7415
5	1	30%	50.76	139.748	190.508	69.8740	62.8866	6.9874
6	1	20%	33.84	159.712	193.552	79.8560	71.8704	7.9856
7	1	10%	16.92	179.676	196.596	89.8380	80.8542	8.9838
8	1	5%	8.46	189.658	198.118	94.8290	85.3461	9.4829
9	1.5	30%	76.14	209.622	285.762	104.8110	94.3299	10.4811
10	1.5	20%	50.76	239.568	290.328	119.7840	107.8056	11.9784
11	1.5	10%	25.38	269.514	294.894	134.7570	121.2813	13.4757

12	1.5	5%	12.69	284.487	297.177	142.2435	128.0192	14.2244
13	2	30%	101.52	279.496	381.016	139.7480	125.7732	13.9748
14	2	20%	67.68	319.424	387.104	159.7120	143.7408	15.9712
15	2	10%	33.84	359.352	393.192	179.6760	161.7084	17.9676
16A	2	5%	16.92	379.316	396.236	189.6580	170.6922	18.9658
16B	2	5%	16.92	379.316	396.236	189.6580	170.6922	18.9658
17	0.5	1%	0.846	98.8218	99.668	49.4109	44.4698	4.9411
18	1	1%	1.692	197.6436	199.336	98.8218	88.9396	9.8822
19	1.5	1%	2.538	296.4654	299.003	148.2327	133.4094	14.8233
20A	2	1%	3.384	395.2872	398.671	197.6436	177.8792	19.7644
20B	2	1%	3.384	395.2872	398.671	197.6436	177.8792	19.7644
20C	2	1%	3.384	395.2872	398.671	197.6436	177.8792	19.7644

Nota. Los escenarios con letra hacen referencia al número de veces que se repitió el experimento.

Tabla 24.

Escenarios – POST SIM – NO RETURN ZONES.

	NO RETURN ZONES					
Escenarios	NRZ 1 (kg/s oil)	NRZ 1 Acumulado (kg oil)	NRZ 1 (% perdido)	NRZ 2 (kg/s oil)	NRZ 2 Acumulado (kg oil)	NRZ 2 (% perdido)
1	0.0471	3.1072	0.1857	0.0000	0.0000	0.0000
2	0.1828	13.1806	1.0806	0.0000	0.0000	0.0000
3	0.2550	20.7012	3.0142	0.0000	0.0000	0.0000
4	0.6427	69.6501	15.1950	0.0000	0.0000	0.0000
5	0.3184	20.3886	0.6273	0.1042	6.6723	0.2053
6	0.4911	32.4373	1.4513	0.1609	10.6271	0.4755
7	0.0573	4.1337	0.3389	0.2618	18.8722	1.5472
8	0.0976	8.2170	1.1538	0.2208	18.5873	2.6099
9	0.3603	10.8080	0.4732	4.9168	147.5047	6.4576
10	0.0106	0.4016	0.0208	1.3208	50.1904	2.6020
11	0.0000	0.0000	0.0000	2.3439	131.2574	9.2352
12	0.0000	0.0000	0.0000	0.3592	27.8378	2.8309
13	0.0304	0.7748	0.0299	12.3123	313.9639	12.1280
14	0.0000	0.0000	0.0000	5.7232	183.1425	8.4563
15	0.0000	0.0000	0.0000	2.0443	98.1284	6.0412
16A	0.0003	0.0240	0.0020	4.9105	343.7371	29.0220
16B	0.0000	0.0000	0.0000	0.8614	49.1002	5.0911

17	0.0757	37.0764	8.9440	0.0000	0.0005	0.0001
18	0.0000	0.0000	0.0000	0.0624	13.7338	3.6895
19	0.7264	101.6902	28.6193	0.3519	49.2626	13.8643
20A	3.1755	260.3907	93.8386	1.0952	89.8086	32.3648
20B	3.8583	385.8302	114.0160	0.3012	30.1216	8.9012
20C	3.5810	358.0998	105.8214	1.0980	109.7991	32.4465

Nota. Los escenarios con letra hacen referencia al número de veces que se repitió el experimento.

Tabla 25.*Escenarios – POST SIM – LAST SECTION (AREA).*

Escenarios	LAST SECTION (AREA)						
	Masa Oil (kg)	Masa Water (kg)	Masa Water Top (kg)	Masa Water Bot (kg)	Eficiencia Decantación (%)	Tiempo de llenado (s)	Tiempo total (s)
1	1081.095	159.0881	41.2080	117.8801	74.097	63.06	65.94
2	1120.83	79.0620	4.0926	74.9694	94.824	67.09	72.09
3	1031.854	144.3560	3.3594	140.9966	97.673	79.18	81.18
4	814.1123	388.9265	0.5084	388.4181	99.869	103.36	108.36
5	1194.882	95.8706	33.1004	62.7703	65.474	59.03	64.03
6	1192.455	53.2530	20.3099	32.9432	61.862	61.05	66.05
7	1062.941	152.5680	18.5073	134.0607	87.869	67.09	72.09
8	834.3304	362.6342	4.8746	357.7596	98.656	79.18	84.18
9	974.1671	322.0625	128.2241	193.8384	60.187	25	30
10	1121.169	96.2932	25.1125	71.1807	73.921	33	38
11	940.1633	242.5990	86.6527	155.9463	64.282	51	56
12	795.6991	447.7413	99.8904	347.8509	77.690	72.49	77.49
13	976.2317	238.2206	110.3557	127.8649	53.675	20.5	25.5
14	1141.467	168.8139	50.8189	117.9950	69.896	27	32
15	1024.859	245.1583	69.1346	176.0237	71.800	43	48
16A	886.5816	356.2178	89.5439	266.6739	74.863	65	70

16B	707.6084	527.9036	105.0883	422.8153	80.093	52	57
17	346.0954	974.4630	370.4462	604.0168	100.000	485	490
18	278.2901	1071.0264	463.0173	608.0091	100.000	215	220
19	289.9321	1025.2035	430.4491	594.7544	100.000	135	140
20A	120.8008	1239.8011	633.2582	606.5429	100.000	77	82
20B	159.5914	1158.6260	549.9302	608.6958	100.000	95	100
20C	148.9053	1168.7110	559.8277	608.8833	100.000	95	100

Nota. Los escenarios con letra hacen referencia al número de veces que se repitió el experimento.

Tabla 26.

Escenarios – EFICIENCIA DEL PROCESO.

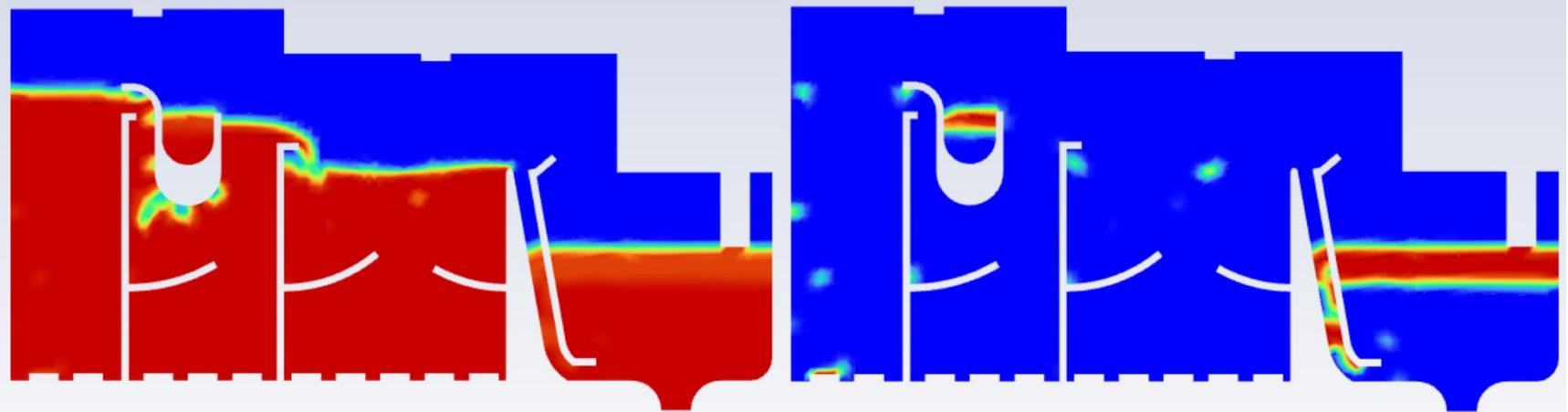
Escenarios	EFICIENCIA DEL PROCESO					
	Oil recovered (kg/s)	Eficiencia Oil (%)	Potencial diario (Barriles)	Oil/Water Ratio (NA)	Water recovered (kg/s)	Eficiencia Water (%)
1	25.333	99.814	11050	6.7956	67.4614	96.5472
2	16.737	98.919	10768	14.1766	79.7992	99.9289
3	8.205	96.986	8399	7.1480	89.7966	99.9539
4	3.587	84.805	5077	2.0932	94.8243	99.995
5	50.337	99.167	13047	12.4635	138.2507	98.9286
6	33.188	98.073	12590	22.3923	158.9057	99.4951
7	16.601	98.114	10212	6.9670	179.4193	99.8571
8	8.142	96.236	6792	2.3007	189.6001	99.9695
9	70.863	93.069	25116	3.0248	198.8866	94.8787
10	49.429	97.377	21898	11.6433	238.9071	99.7241
11	23.036	90.765	11882	3.8754	265.1819	98.3926
12	12.331	97.169	7075	1.7771	283.1979	99.5469
13	89.177	87.842	30694	4.0980	270.1540	96.6576
14	61.957	91.544	27249	6.7617	314.1486	98.3485
15	31.796	93.959	15362	4.1804	354.2445	98.5787
16A	12.009	70.976	8791	2.4889	378.0368	99.6628

16B	16.059	94.909	8771	1.3404	377.4723	99.5140
17	0.770	91.056	460	0.3552	98.8218	100.0000
18	1.630	96.311	834	0.2598	197.6436	100.0000
19	1.460	57.516	1384	0.2828	296.4654	100.0000
20A	-0.887	-26.203	1011	0.0974	395.2872	100.0000
20B	-0.776	-22.917	1083	0.1377	395.2872	100.0000
20C	-1.295	44.003	1010	0.1274	395.2872	100.0000

Nota. Los escenarios con letra hacen referencia al número de veces que se repitió el experimento.

Figura 90.

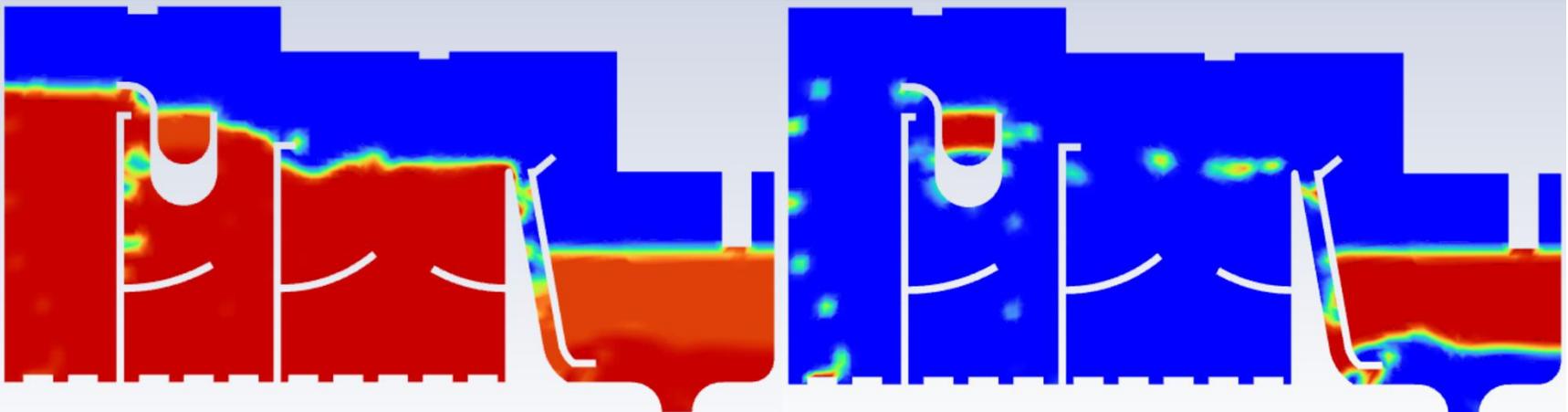
Escenarios: 0,5 m/s – 1% Oil.



Nota. (Izquierda) Contour de densidad: Rojo es agua, naranja es oil, azul es aire; (Derecha) Contour de oil: Rojo es oil, en general azul debajo del *oil* es agua, y azul encima es aire; (Ambos) verde/amarillo es la zona de la interfaz.

Figura 91.

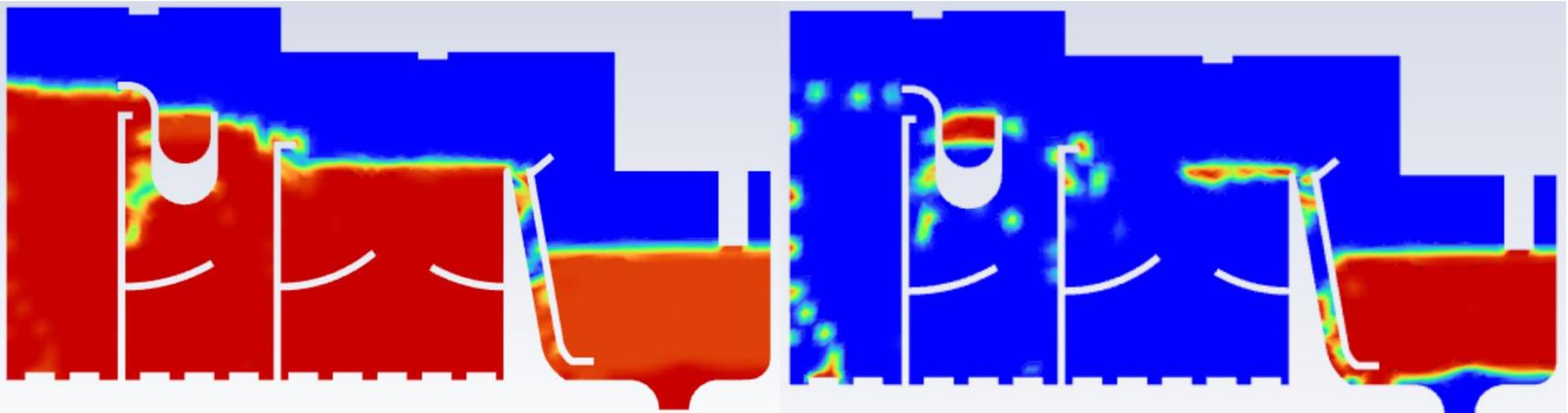
Escenarios: 0,5 m/s – 5% Oil.



Nota. (Izquierda) Contour de densidad: Rojo es agua, naranja es oil, azul es aire; (Derecha) Contour de oil: Rojo es oil, en general azul debajo del *oil* es agua, y azul encima es aire; (Ambos) verde/amarillo es la zona de la interfaz.

Figura 92.

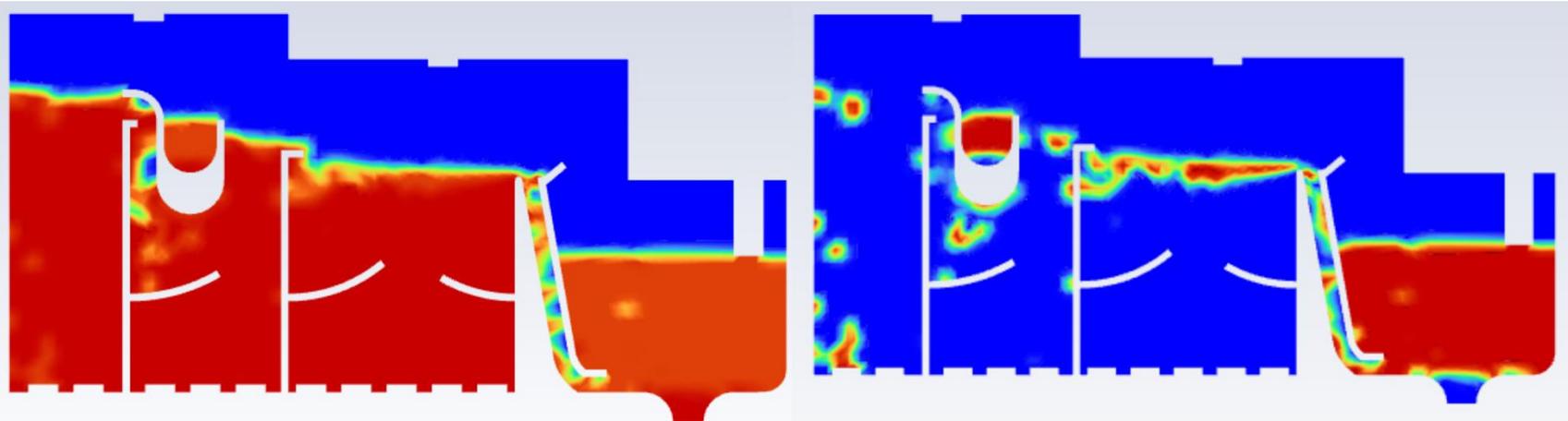
Escenarios: 0,5 m/s – 10% Oil.



Nota. (Izquierda) Contour de densidad: Rojo es agua, naranja es oil, azul es aire; (Derecha) Contour de oil: Rojo es oil, en general azul debajo del *oil* es agua, y azul encima es aire; (Ambos) verde/amarillo es la zona de la interfaz.

Figura 93.

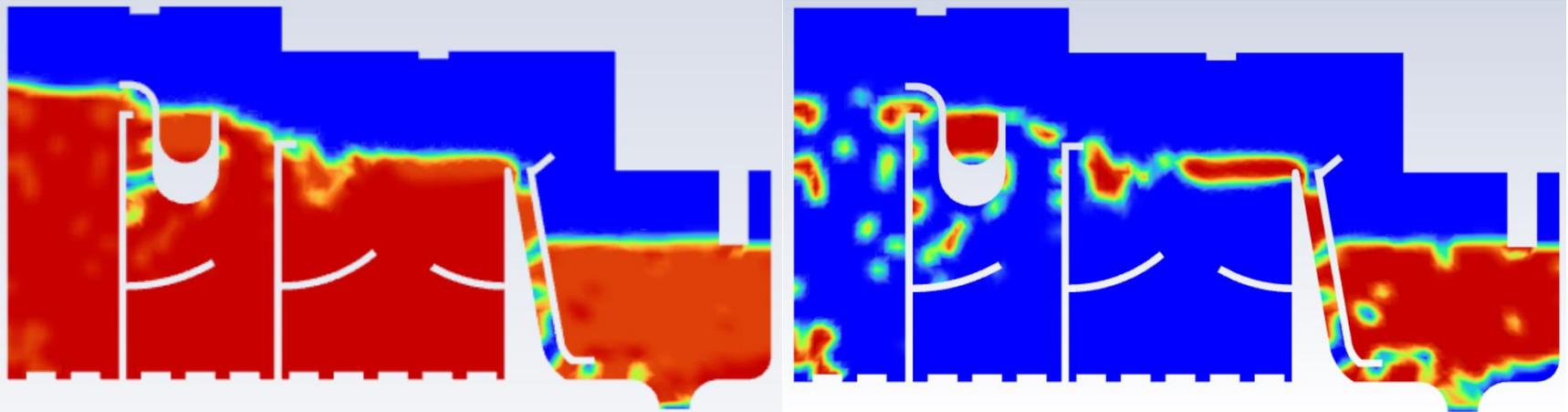
Escenarios: 0,5 m/s – 20% Oil.



Nota. (Izquierda) Contour de densidad: Rojo es agua, naranja es oil, azul es aire; (Derecha) Contour de oil: Rojo es oil, en general azul debajo del *oil* es agua, y azul encima es aire; (Ambos) verde/amarillo es la zona de la interfaz.

Figura 94.

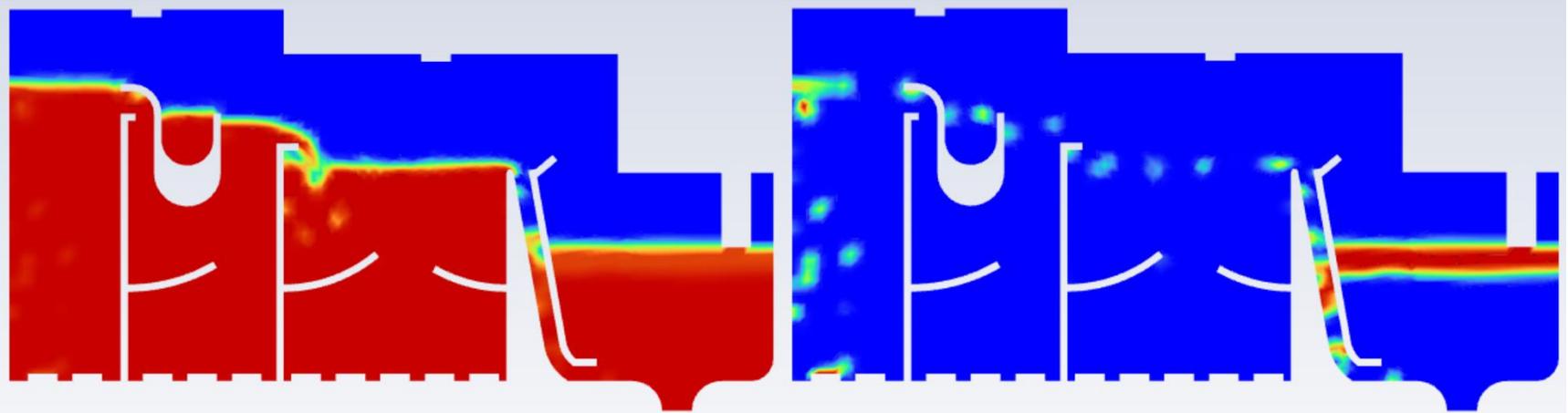
Escenarios: 0,5 m/s – 30% Oil.



Nota. (Izquierda) Contour de densidad: Rojo es agua, naranja es oil, azul es aire; (Derecha) Contour de oil: Rojo es oil, en general azul debajo del *oil* es agua, y azul encima es aire; (Ambos) verde/amarillo es la zona de la interfaz.

Figura 95.

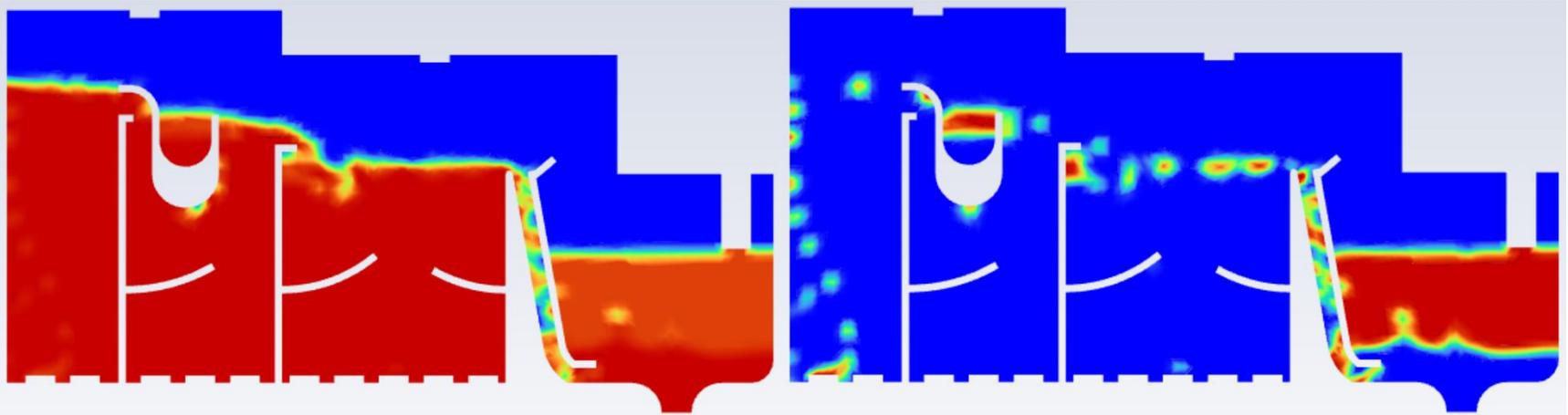
Escenarios: 1,0 m/s – 1% Oil.



Nota. (Izquierda) Contour de densidad: Rojo es agua, naranja es oil, azul es aire; (Derecha) Contour de oil: Rojo es oil, en general azul debajo del *oil* es agua, y azul encima es aire; (Ambos) verde/amarillo es la zona de la interfaz.

Figura 96.

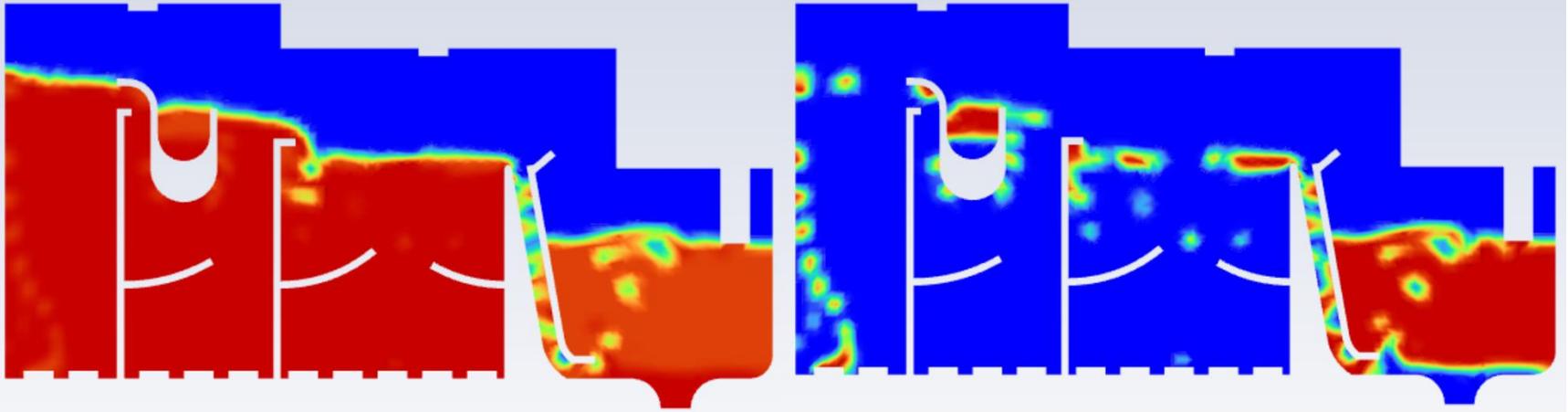
Escenarios: 1,0 m/s – 5% Oil.



Nota. (Izquierda) Contour de densidad: Rojo es agua, naranja es oil, azul es aire; (Derecha) Contour de oil: Rojo es oil, en general azul debajo del *oil* es agua, y azul encima es aire; (Ambos) verde/amarillo es la zona de la interfaz.

Figura 97.

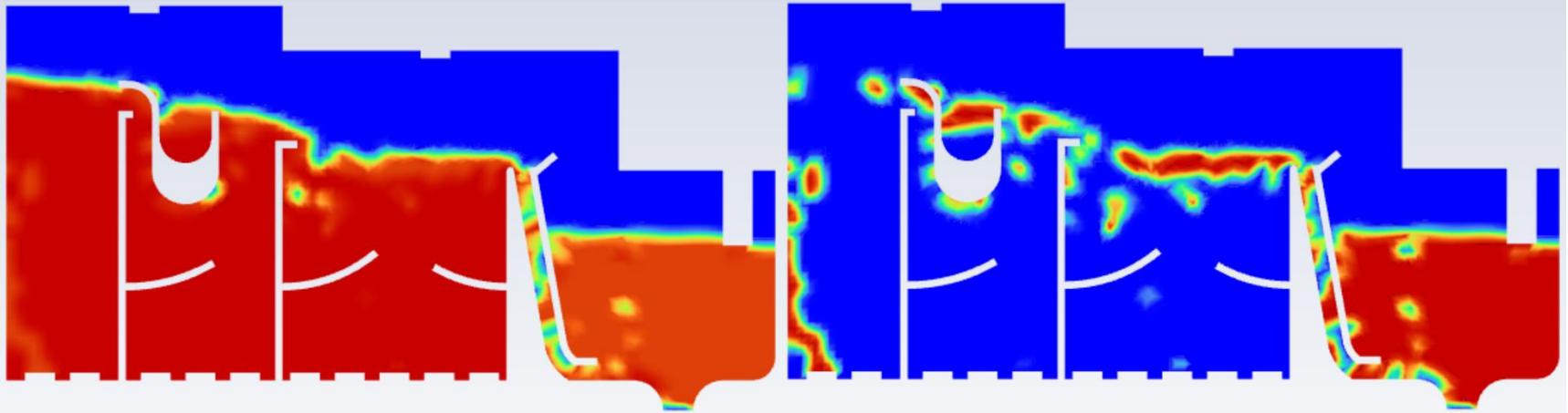
Escenarios: 1,0 m/s – 10% Oil.



Nota. (Izquierda) Contour de densidad: Rojo es agua, naranja es oil, azul es aire; (Derecha) Contour de oil: Rojo es oil, en general azul debajo del *oil* es agua, y azul encima es aire; (Ambos) verde/amarillo es la zona de la interfaz.

Figura 98.

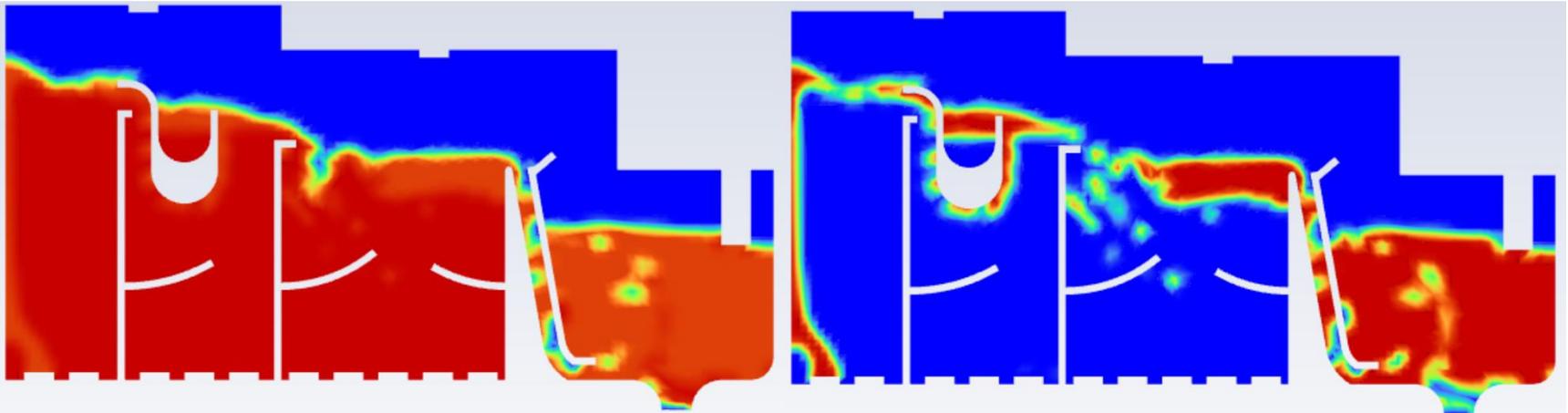
Escenarios: 1,0 m/s – 20% Oil.



Nota. (Izquierda) Contour de densidad: Rojo es agua, naranja es oil, azul es aire; (Derecha) Contour de oil: Rojo es oil, en general azul debajo del *oil* es agua, y azul encima es aire; (Ambos) verde/amarillo es la zona de la interfaz.

Figura 99.

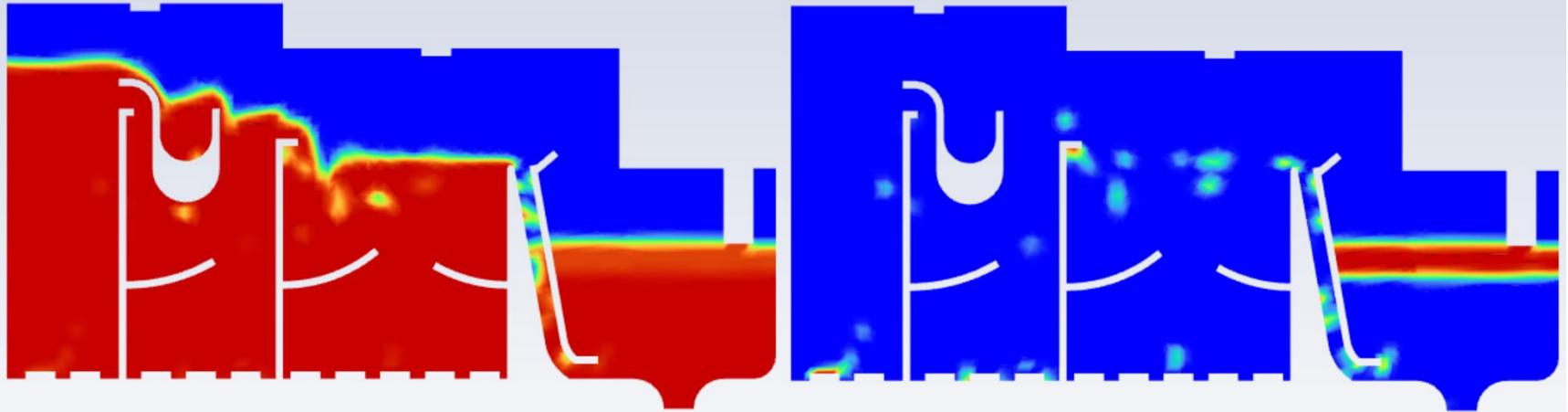
Escenarios: 1,0 m/s – 30% Oil.



Nota. (Izquierda) Contour de densidad: Rojo es agua, naranja es oil, azul es aire; (Derecha) Contour de oil: Rojo es oil, en general azul debajo del *oil* es agua, y azul encima es aire; (Ambos) verde/amarillo es la zona de la interfaz.

Figura 100.

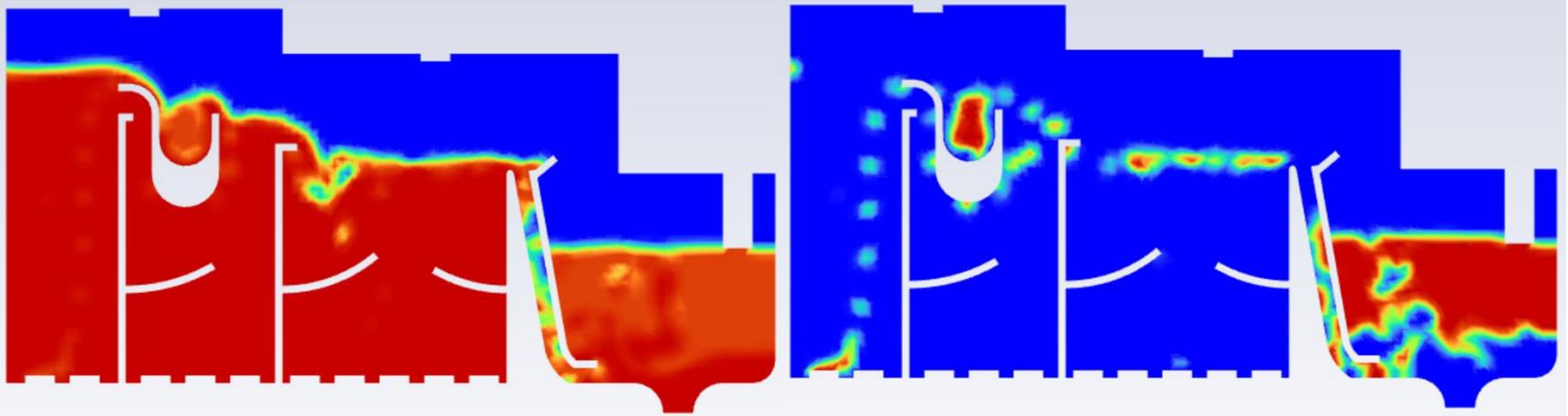
Escenarios: 1,5 m/s – 1% Oil.



Nota. (Izquierda) Contour de densidad: Rojo es agua, naranja es oil, azul es aire; (Derecha) Contour de oil: Rojo es oil, en general azul debajo del *oil* es agua, y azul encima es aire; (Ambos) verde/amarillo es la zona de la interfaz.

Figura 101.

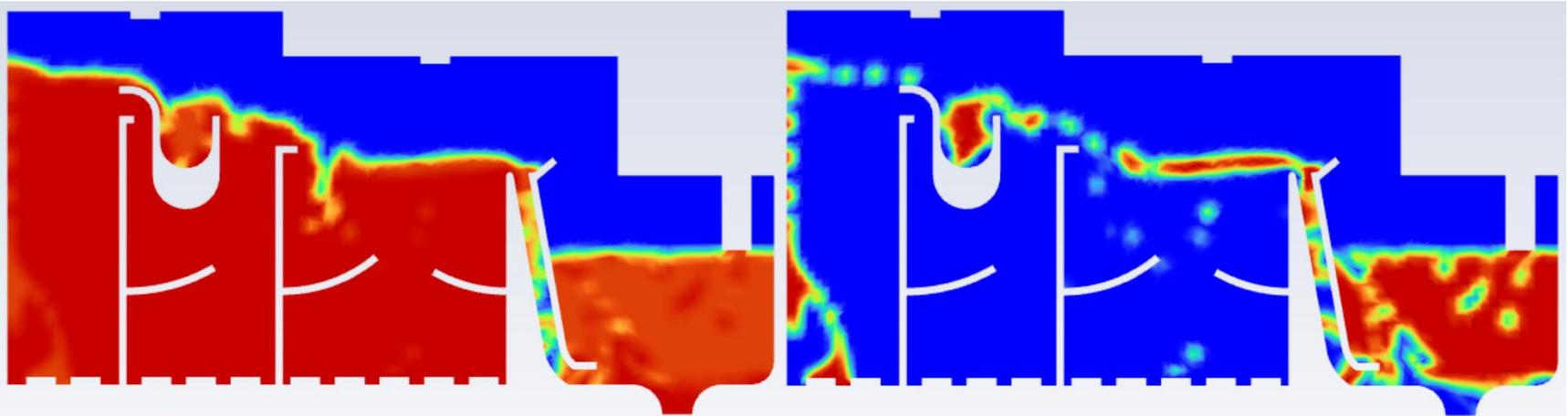
Escenarios: 1,5 m/s – 5% Oil.



Nota. (Izquierda) Contour de densidad: Rojo es agua, naranja es oil, azul es aire; (Derecha) Contour de oil: Rojo es oil, en general azul debajo del *oil* es agua, y azul encima es aire; (Ambos) verde/amarillo es la zona de la interfaz.

Figura 102.

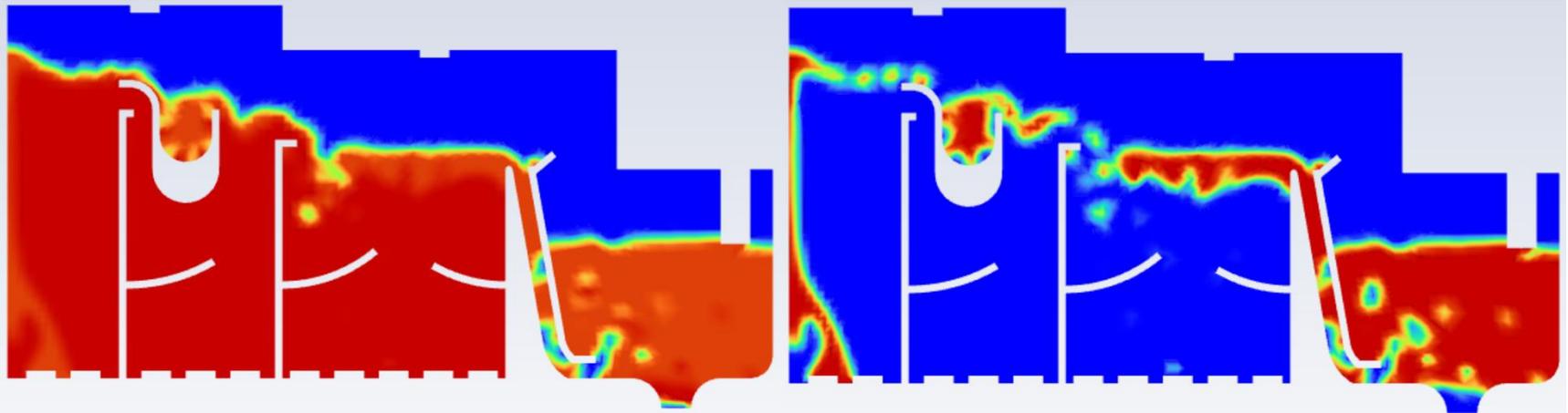
Escenarios: 1,5 m/s – 10% Oil.



Nota. (Izquierda) Contour de densidad: Rojo es agua, naranja es oil, azul es aire; (Derecha) Contour de oil: Rojo es oil, en general azul debajo del *oil* es agua, y azul encima es aire; (Ambos) verde/amarillo es la zona de la interfaz.

Figura 103.

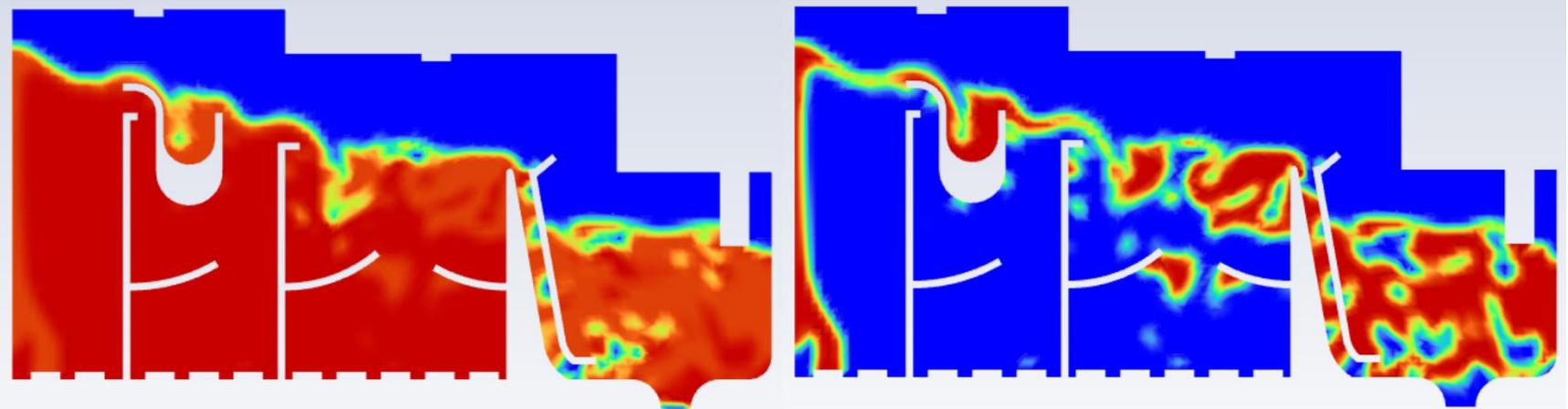
Escenarios: 1,5 m/s – 20% Oil.



Nota. (Izquierda) Contour de densidad: Rojo es agua, naranja es oil, azul es aire; (Derecha) Contour de oil: Rojo es oil, en general azul debajo del *oil* es agua, y azul encima es aire; (Ambos) verde/amarillo es la zona de la interfaz.

Figura 104.

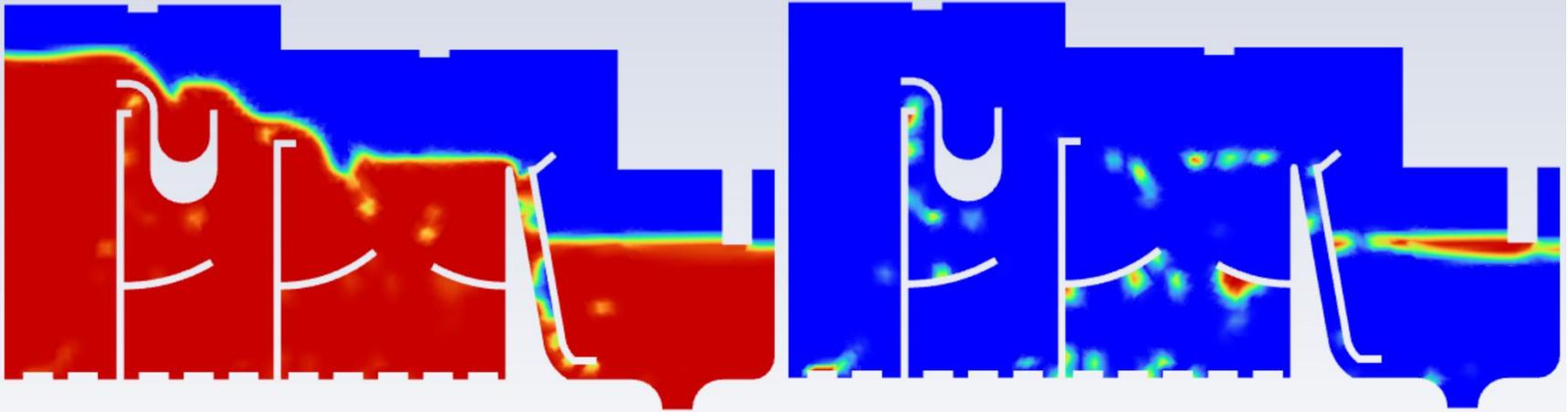
Escenarios: 1,5 m/s – 30% Oil.



Nota. (Izquierda) Contour de densidad: Rojo es agua, naranja es oil, azul es aire; (Derecha) Contour de oil: Rojo es oil, en general azul debajo del *oil* es agua, y azul encima es aire; (Ambos) verde/amarillo es la zona de la interfaz.

Figura 105.

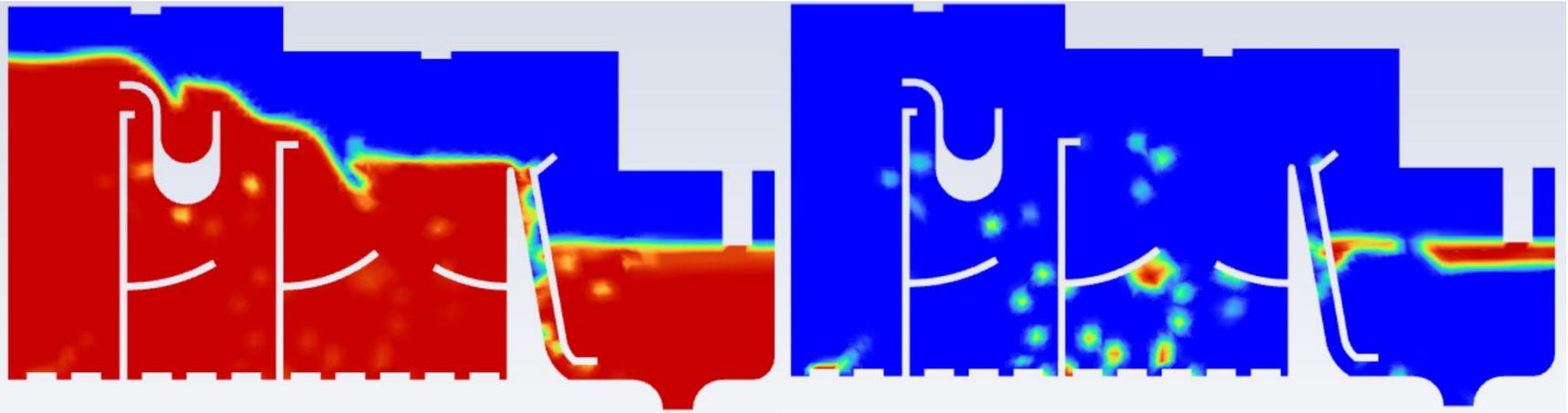
Escenarios: 2,0 m/s – 1% Oil (A).



Nota. (Izquierda) Contour de densidad: Rojo es agua, naranja es oil, azul es aire; (Derecha) Contour de oil: Rojo es oil, en general azul debajo del *oil* es agua, y azul encima es aire; (Ambos) verde/amarillo es la zona de la interfaz.

Figura 106.

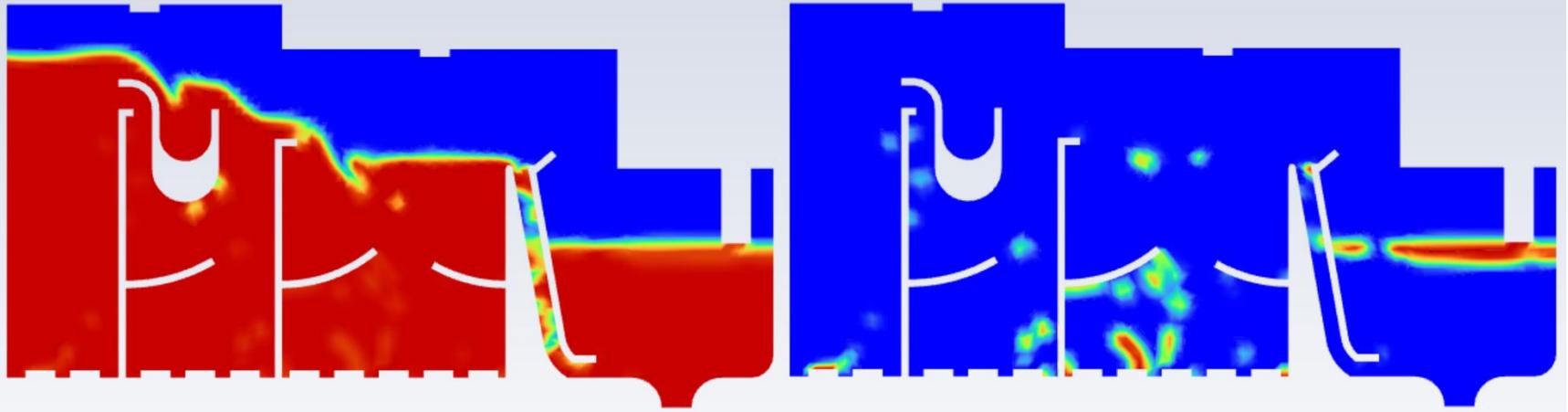
Escenarios: 2,0 m/s – 1% Oil (B).



Nota. (Izquierda) Contour de densidad: Rojo es agua, naranja es oil, azul es aire; (Derecha) Contour de oil: Rojo es oil, en general azul debajo del *oil* es agua, y azul encima es aire; (Ambos) verde/amarillo es la zona de la interfaz.

Figura 107.

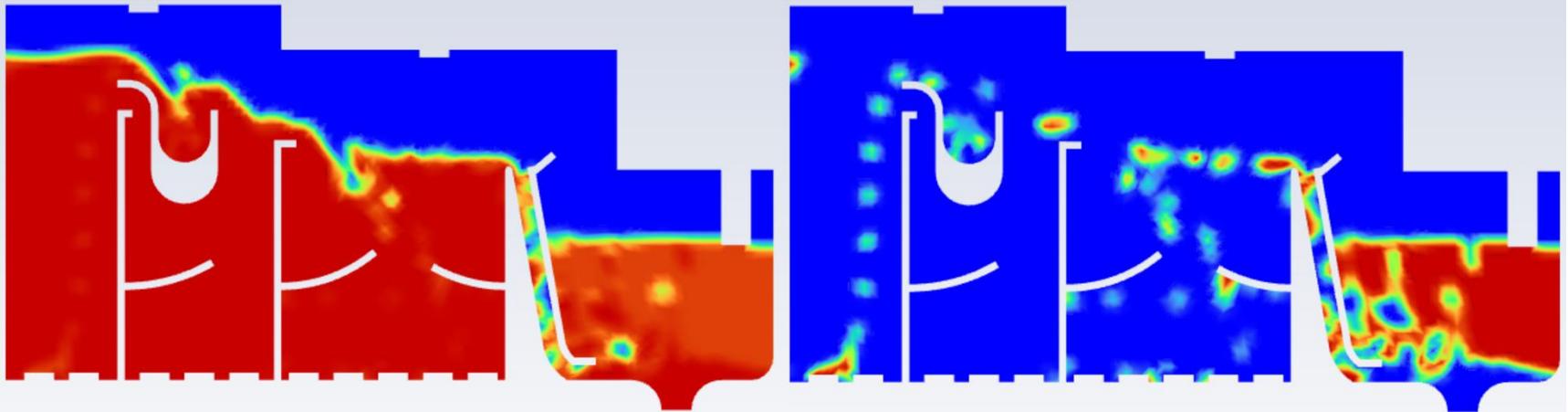
Escenarios: 2,0 m/s – 1% Oil (C).



Nota. (Izquierda) Contour de densidad: Rojo es agua, naranja es oil, azul es aire; (Derecha) Contour de oil: Rojo es oil, en general azul debajo del *oil* es agua, y azul encima es aire; (Ambos) verde/amarillo es la zona de la interfaz.

Figura 108.

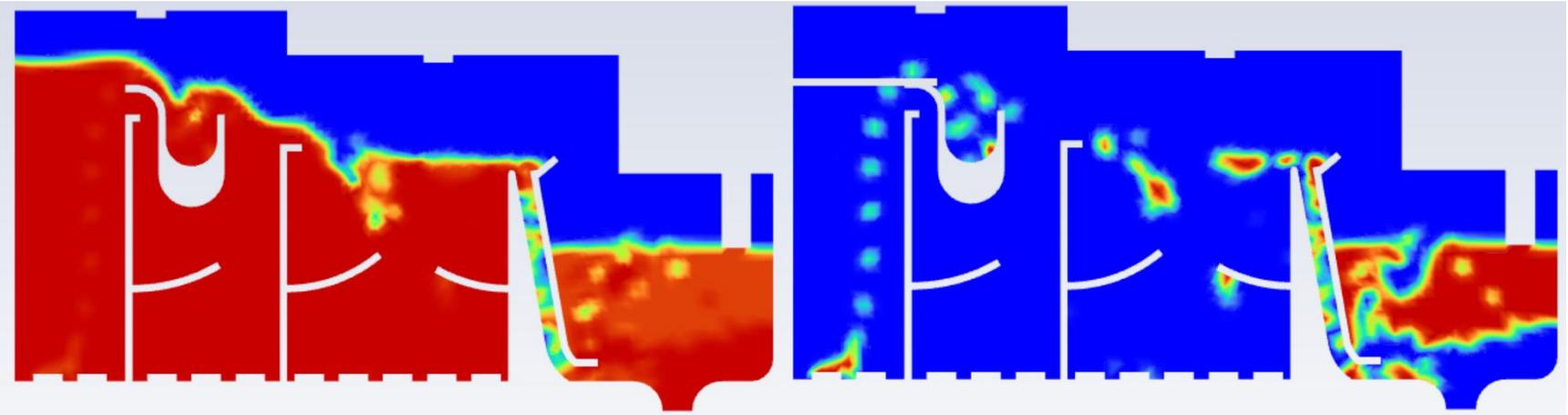
Escenarios: 2,0 m/s – 5% Oil (A).



Nota. (Izquierda) Contour de densidad: Rojo es agua, naranja es oil, azul es aire; (Derecha) Contour de oil: Rojo es oil, en general azul debajo del *oil* es agua, y azul encima es aire; (Ambos) verde/amarillo es la zona de la interfaz.

Figura 109.

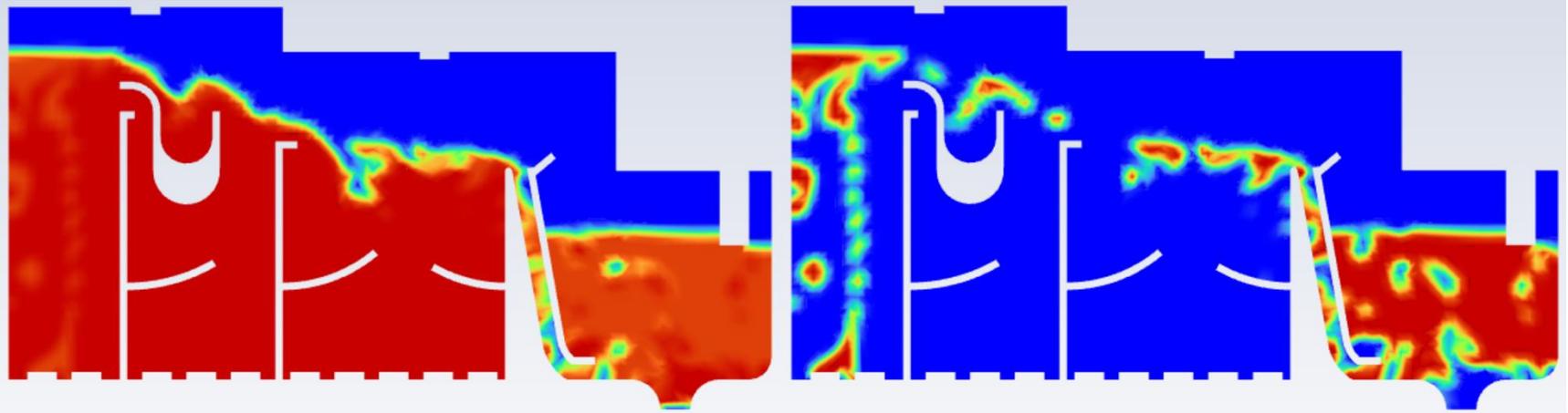
Escenarios: 2,0 m/s – 5% Oil (B).



Nota. (Izquierda) Contour de densidad: Rojo es agua, naranja es oil, azul es aire; (Derecha) Contour de oil: Rojo es oil, en general azul debajo del *oil* es agua, y azul encima es aire; (Ambos) verde/amarillo es la zona de la interfaz.

Figura 110.

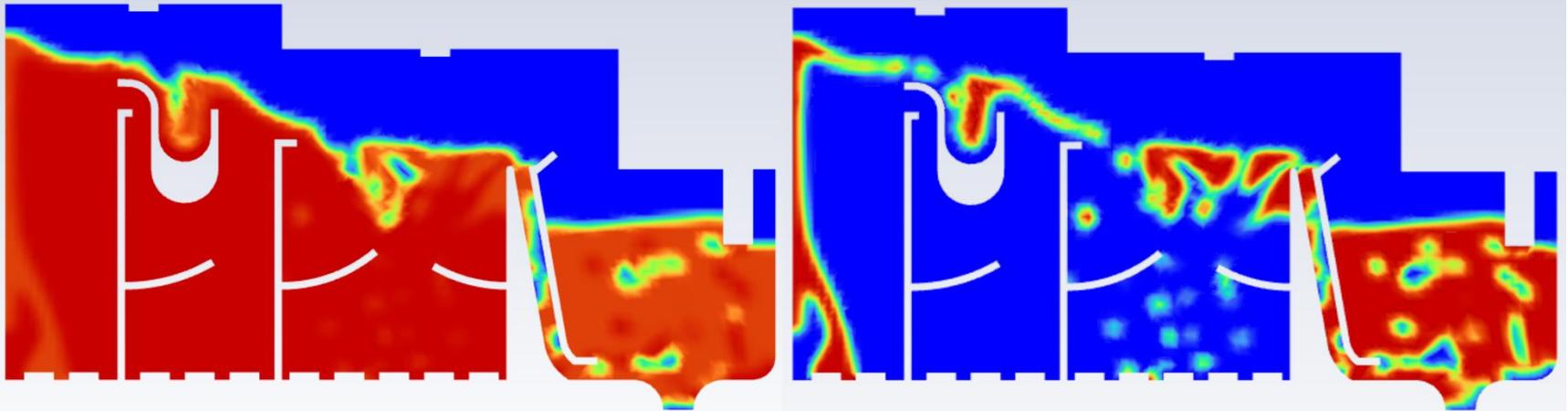
Escenarios: 2,0 m/s – 10% Oil.



Nota. (Izquierda) Contour de densidad: Rojo es agua, naranja es oil, azul es aire; (Derecha) Contour de oil: Rojo es oil, en general azul debajo del *oil* es agua, y azul encima es aire; (Ambos) verde/amarillo es la zona de la interfaz.

Figura 111.

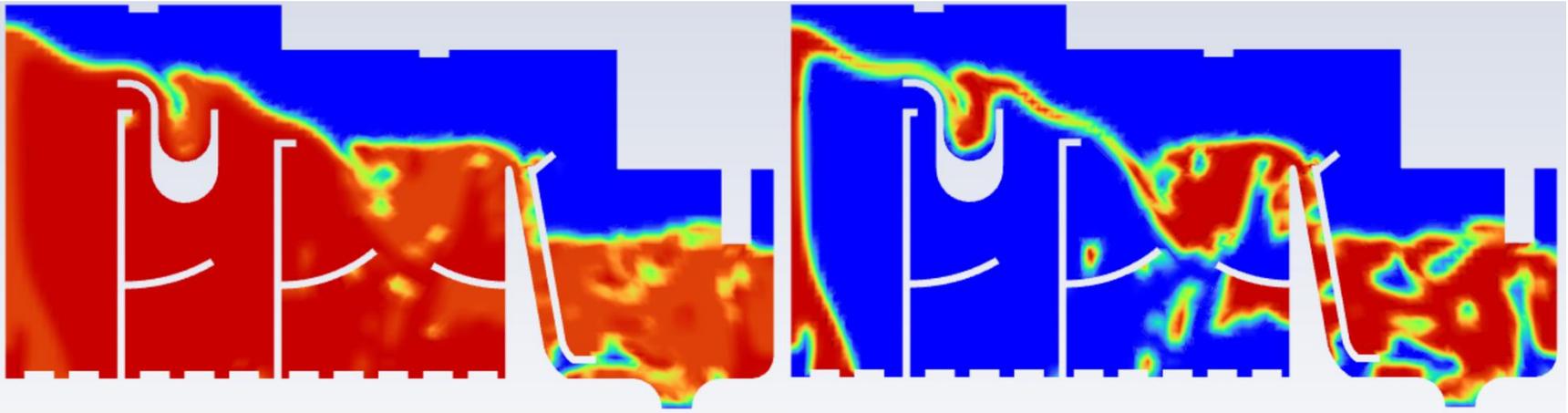
Escenarios: 2,0 m/s – 20% Oil.



Nota. (Izquierda) Contour de densidad: Rojo es agua, naranja es oil, azul es aire; (Derecha) Contour de oil: Rojo es oil, en general azul debajo del *oil* es agua, y azul encima es aire; (Ambos) verde/amarillo es la zona de la interfaz.

Figura 112.

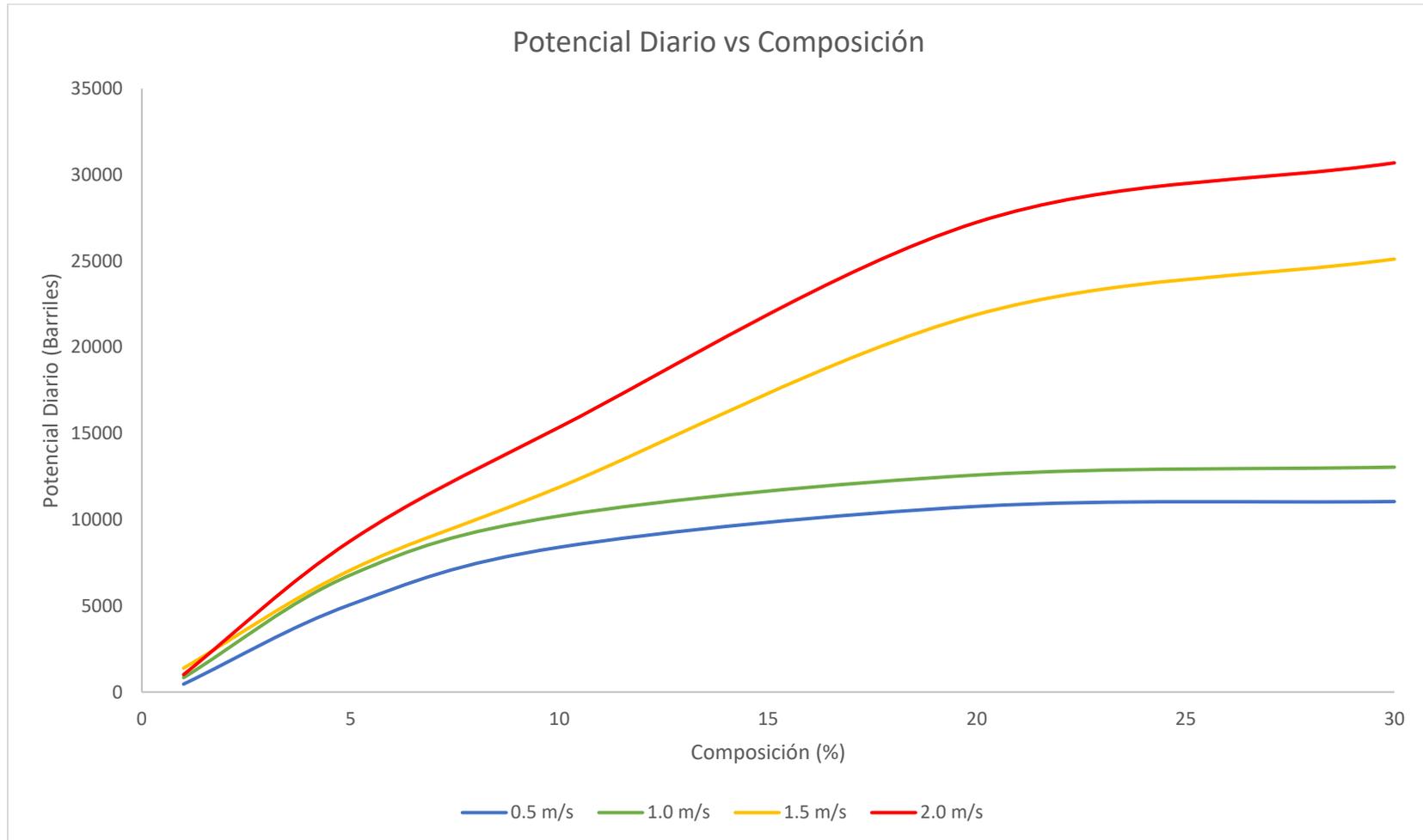
Escenarios: 2,0 m/s – 30% Oil.



Nota. (Izquierda) Contour de densidad: Rojo es agua, naranja es oil, azul es aire; (Derecha) Contour de oil: Rojo es oil, en general azul debajo del *oil* es agua, y azul encima es aire; (Ambos) verde/amarillo es la zona de la interfaz.

Figura 113.

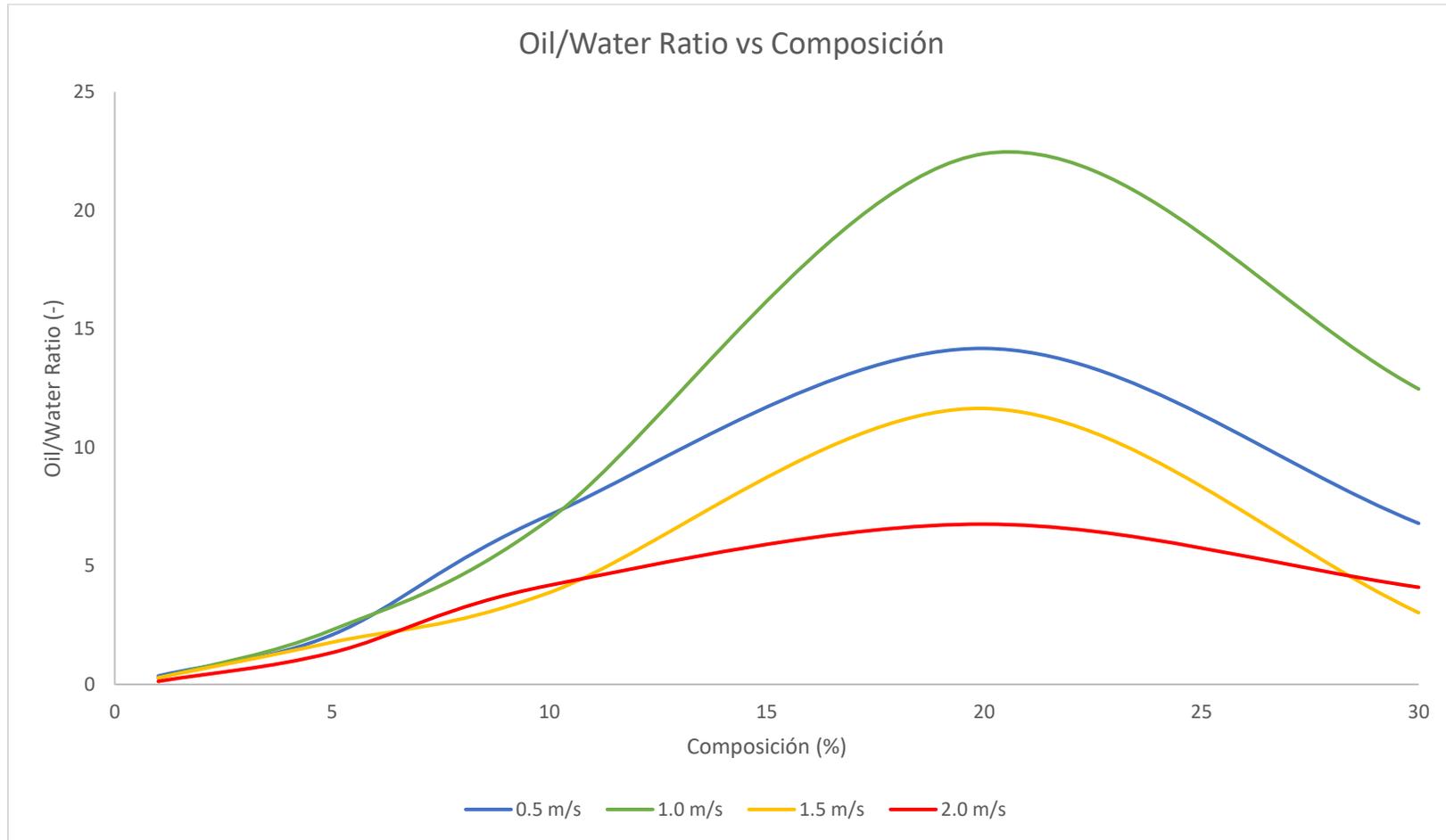
Escenarios: Resultados Primarios – Potencial Diario vs Composición.



Nota. Mayores velocidades indica mayor cantidad de aceite siendo procesado, por ende, aumento el potencial diario.

Figura 114.

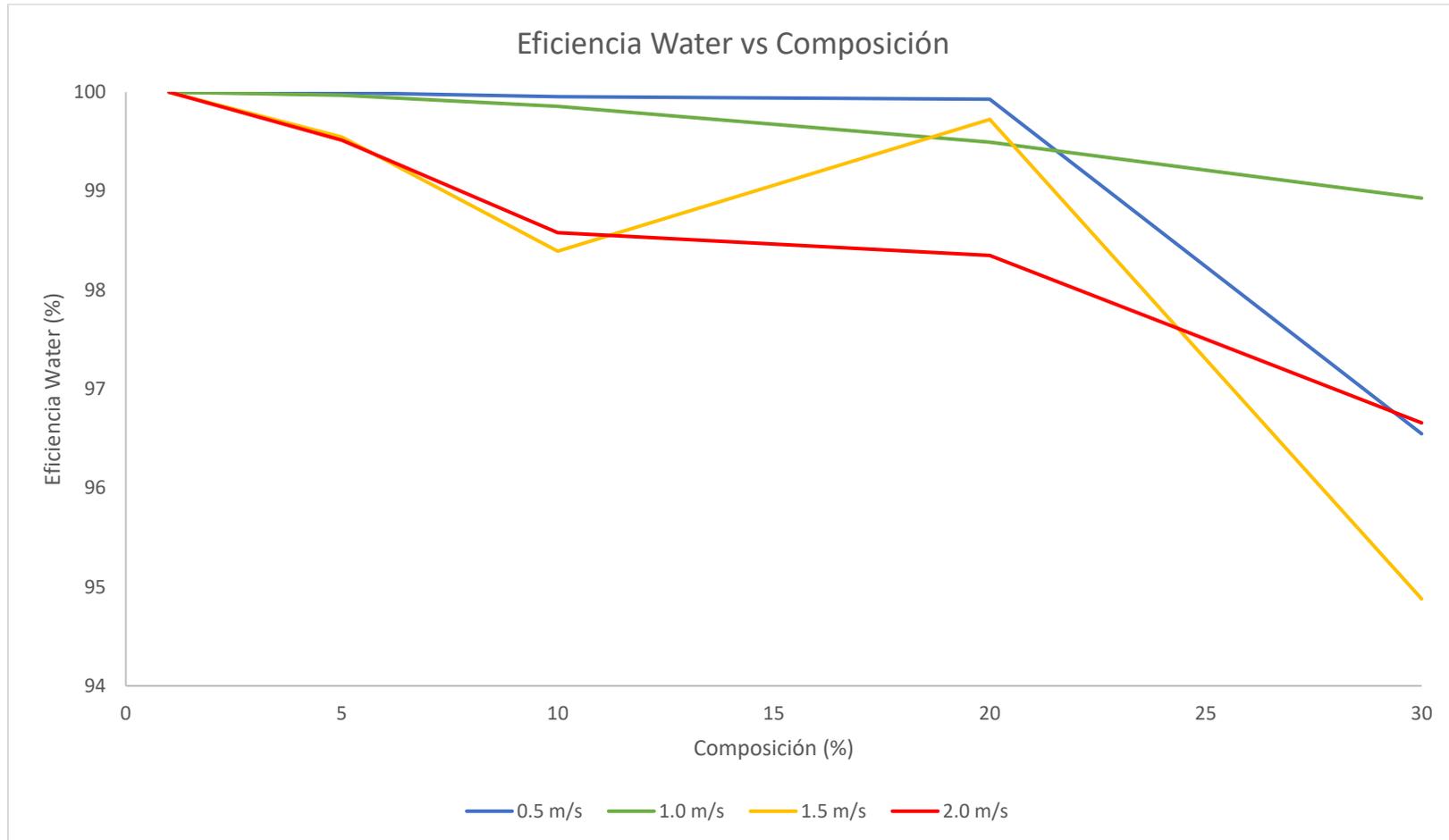
Escenarios: Resultados Primarios – Oil/Water Ratio vs Composición.



Nota. Mientras más alto sea este valor, mejor la separación, ya que indica que en la última sección del separador hay más aceite que agua

Figura 115.

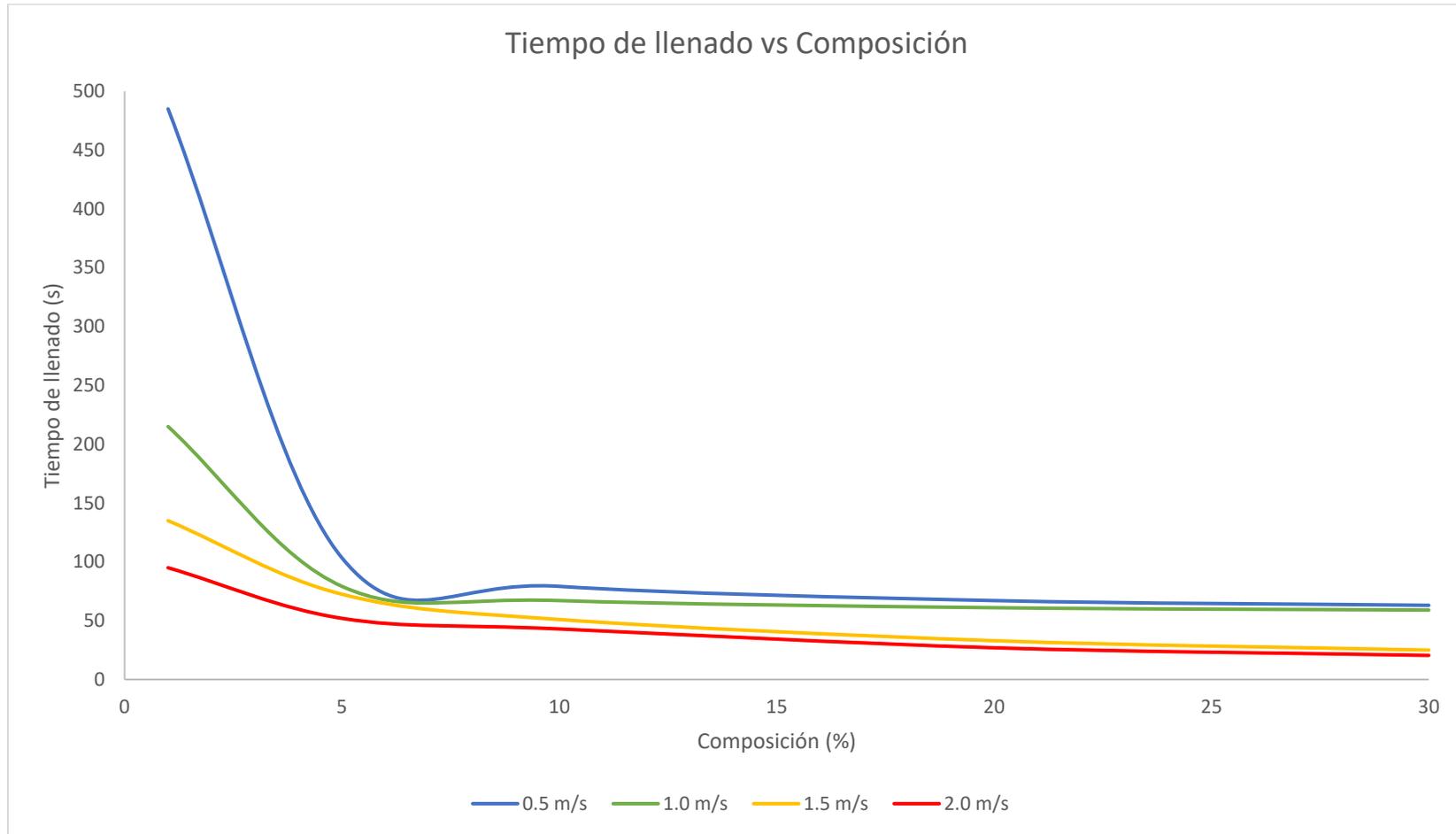
Escenarios: Resultados Primarios – Eficiencia Water vs Composición.



Nota. La razón por la que a 1% de composición todas las velocidades tienen una eficiencia *water* del 100% es una asunción teórica basada en la poca a nula cantidad de aceite cerca de las salidas.

Figura 116.

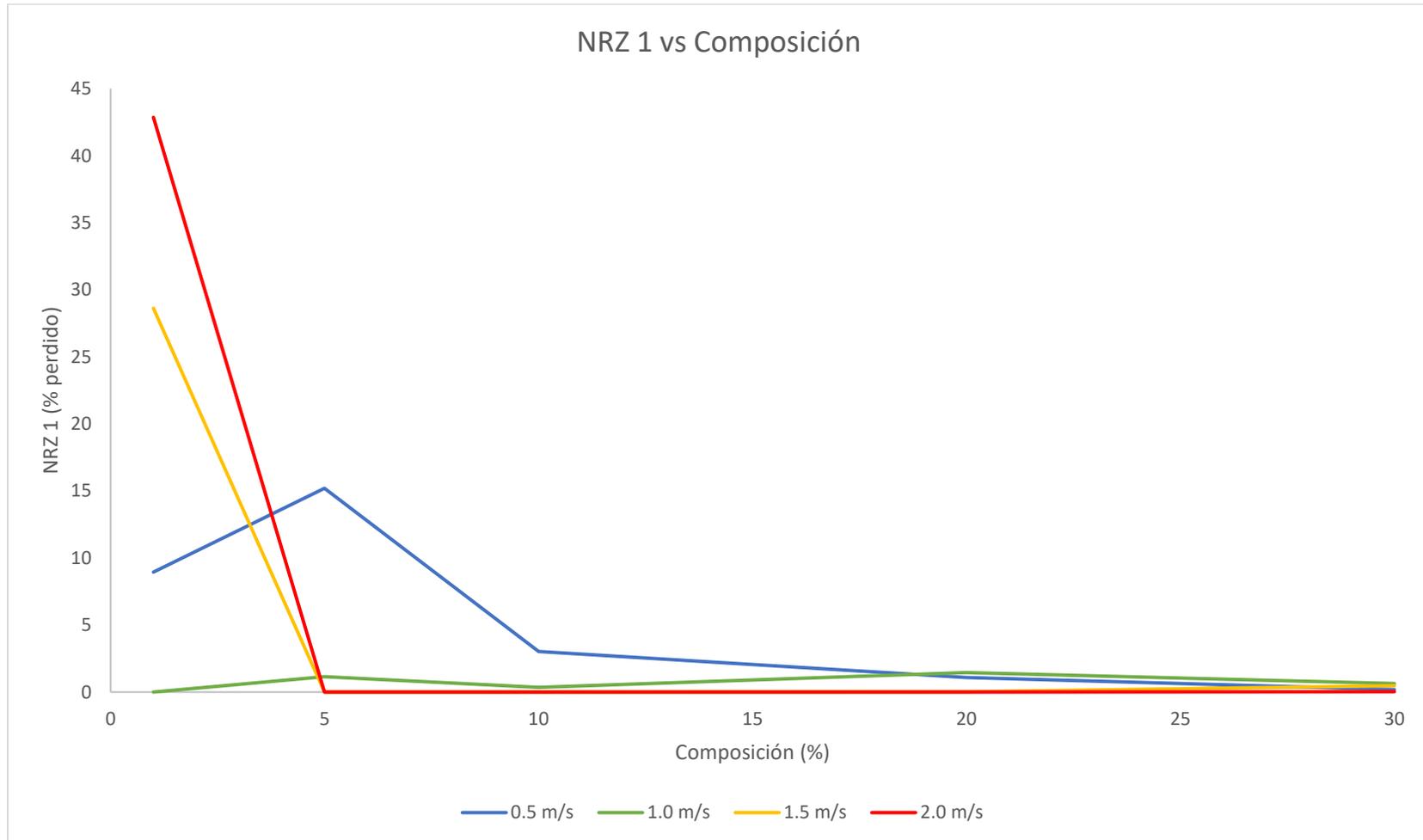
Escenarios: Resultados Secundarios – Tiempo de llenado vs Composición.



Nota. En general los tiempos de llenado son muy similares entre 0,5 m/s y 1,0 m/s, de 1,5 m/s a 2,0 m/s, se notan los mayores saltos.

Figura 117.

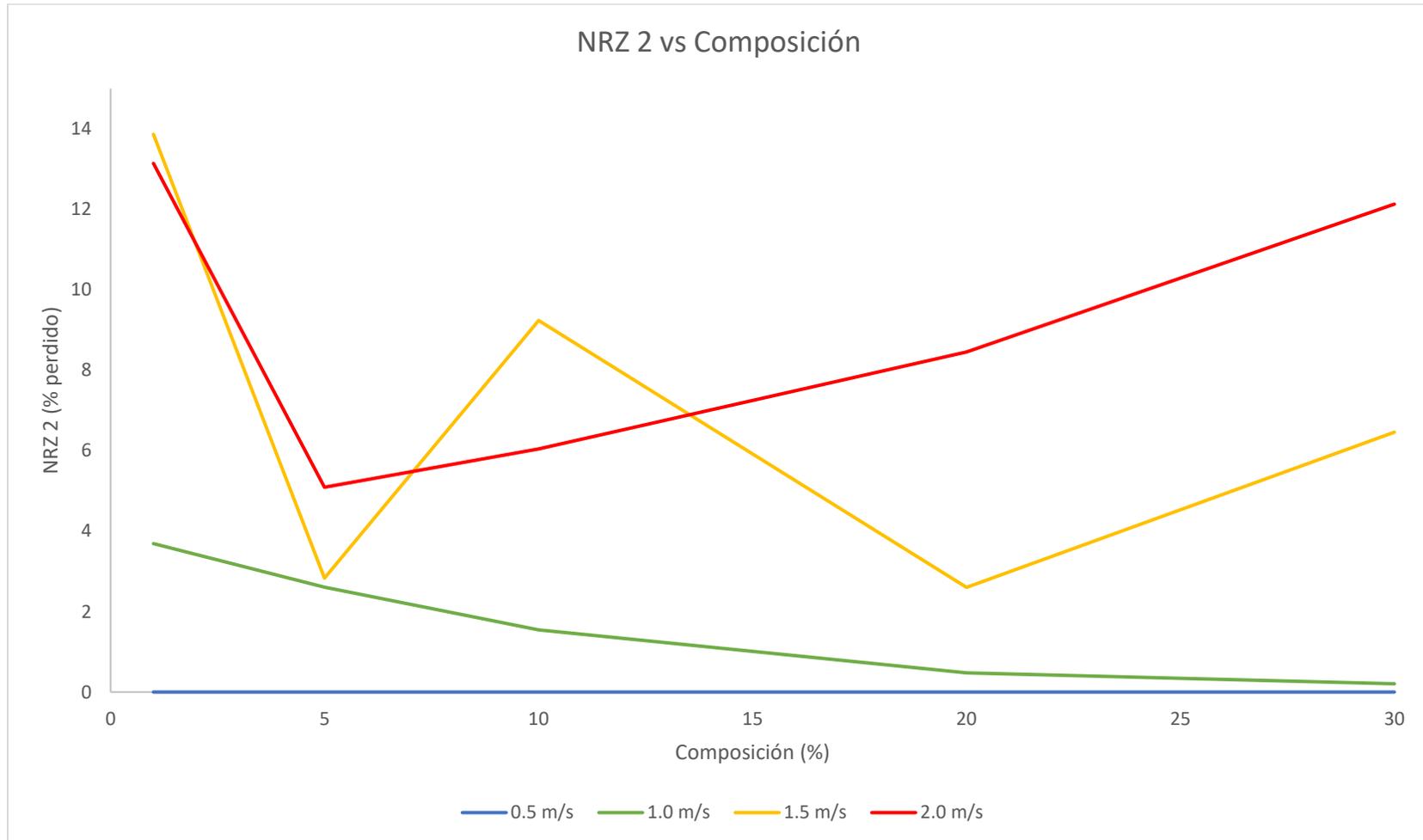
Escenarios: Resultados Secundarios – NRZ 1 vs Composición.



Nota. A 1,0 m/s la pérdida es esencialmente nula a todas las composiciones.

Figura 118.

Escenarios: Resultados Secundarios – NRZ 2 vs Composición.



Nota. La velocidad de 0,5 m/s es la que menos pérdidas sufre, siendo el valor prácticamente nulo en todas las composiciones.

Figura 119.

Propiedades de fluidos – Agua.

Density [kg/m ³]	constant	Molecular Weight [kg/kmol]	constant	L-J Characteristic Length [Angstrom]	constant
	998.2		18.0152		1
Cp (Specific Heat) [J/(kg K)]	constant	Standard State Enthalpy [J/kgmol]	constant	L-J Energy Parameter [K]	constant
	4182		-2.858e+08		100
Thermal Conductivity [W/(m K)]	constant	Standard State Entropy [J/(kgmol K)]	constant	Latent Heat [J/kg]	constant
	0.6		69902.21		2263073
Viscosity [kg/(m s)]	constant	Reference Temperature [K]	constant	Vaporization Temperature [K]	constant
	0.001003		298		284
Boiling Point [K]	constant	Binary Diffusivity [m ² /s]	film-averaged	Droplet Surface Tension [N/m]	constant
	373				0.0719404
Volatile Component Fraction [%]	constant	Saturation Vapor Pressure [Pa]	piecewise-linear	Equilibrium Species Phase for PDF model	constant
	100				1

Nota. Extraído de la base de datos de Ansys Fluent, dentro del proyecto.

Figura 120.

Propiedades de fluidos – Diésel.

Density [kg/m ³]	constant	Molecular Weight [kg/kmol]	constant	Boiling Point [K]	constant
	846		180.33		541
Cp (Specific Heat) [J/(kg K)]	constant	Reference Temperature [K]	constant	Volatile Component Fraction [%]	constant
	2193.27		298.15		100
Thermal Conductivity [W/(m K)]	constant	Latent Heat [J/kg]	constant	Binary Diffusivity [m ² /s]	constant
	0.1157		234330		4.942e-06
Viscosity [kg/(m s)]	constant	Vaporization Temperature [K]	constant	Diffusivity Reference Pressure [Pa]	constant
	0.0029		325		101325
Saturation Vapor Pressure [Pa]	constant	Droplet Surface Tension [N/m]	constant		
	1.335		0.79		
Temperature Averaging Coefficient	none	Critical Temperature [K]	constant		
			736		
Composition Averaging Coefficient	none	Critical Pressure [Pa]	constant		
			1870000		
Vaporization/Boiling Model	convection/diffusion-controlled	Acentric Factor	constant		
			0.5144		

Nota. Extraído de la base de datos de Ansys Fluent, dentro del proyecto.

Figura 121.

Propiedades de fluidos – Aire.

Density [kg/m ³]	constant	Molecular Weight [kg/kmol]	constant	L-J Characteristic Length [Angstrom]	constant
	1.225		28.966		3.711
Cp (Specific Heat) [J/(kg K)]	constant	Standard State Entropy [J/(kgmol K)]	constant	L-J Energy Parameter [K]	constant
	1006.43		194336		78.6
Thermal Conductivity [W/(m K)]	constant	Characteristic Vibrational Temperature [K]	constant	Thermal Accommodation Coefficient	constant
	0.0242		2686		0.9137
Viscosity [kg/(m s)]	constant	Reference Temperature [K]	constant	Momentum Accommodation Coefficient	constant
	1.7894e-05		298.15		0.9137
Electrical Conductivity [S/m]	constant	Critical Temperature [K]	constant	Critical Specific Volume [m ³ /kg]	constant
	1e-09		132.3		0.002857
Electrolyte Conductivity [S/m]	constant	Critical Pressure [Pa]	constant	Acentric Factor	constant
	1e-09		3758000		0.033

Nota. Extraído de la base de datos de Ansys Fluent, dentro del proyecto.

ANEXO 3

DISEÑO DE PLANTA

P&ID – Versión 1 – Decanter

Ver plano en: Anexo 3 – P&ID V1 Decanter (Plano 1).

P&ID – Versión 1 – Separators

Ver plano en: Anexo 3 – P&ID V1 Separators (Plano 2).

P&ID – Versión 1 – Coagulation/Flocculation System

Ver plano en: Anexo 3 – P&ID V1 Coagulation/Flocculation System (Plano 3).

P&ID – Versión 2 – Pool

Ver plano en: Anexo 3 – P&ID V2 Pool (Plano 1).

P&ID – Versión 2 – Separators

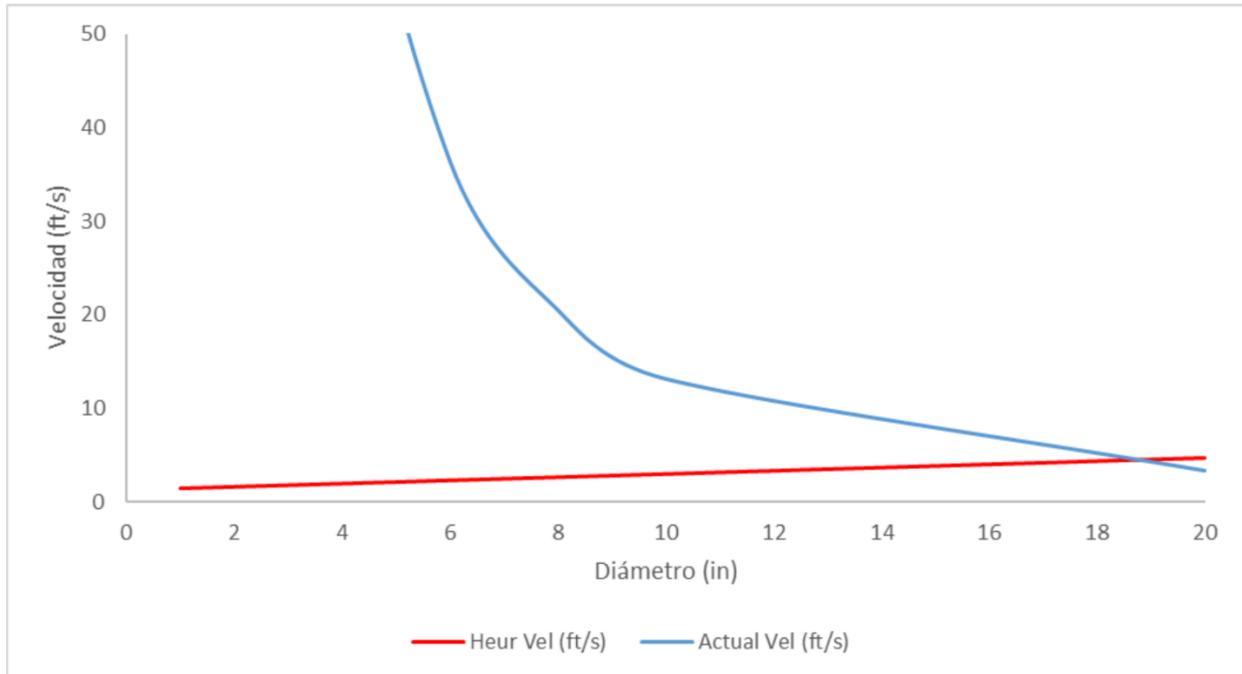
Ver plano en: Anexo 3 – P&ID V2 Separators (Plano 2).

P&ID – Versión 2 – Coagulation/Flocculation System

Ver plano en: Anexo 3 – P&ID V2 Coagulation/Flocculation System (Plano 3).

Figura 122.

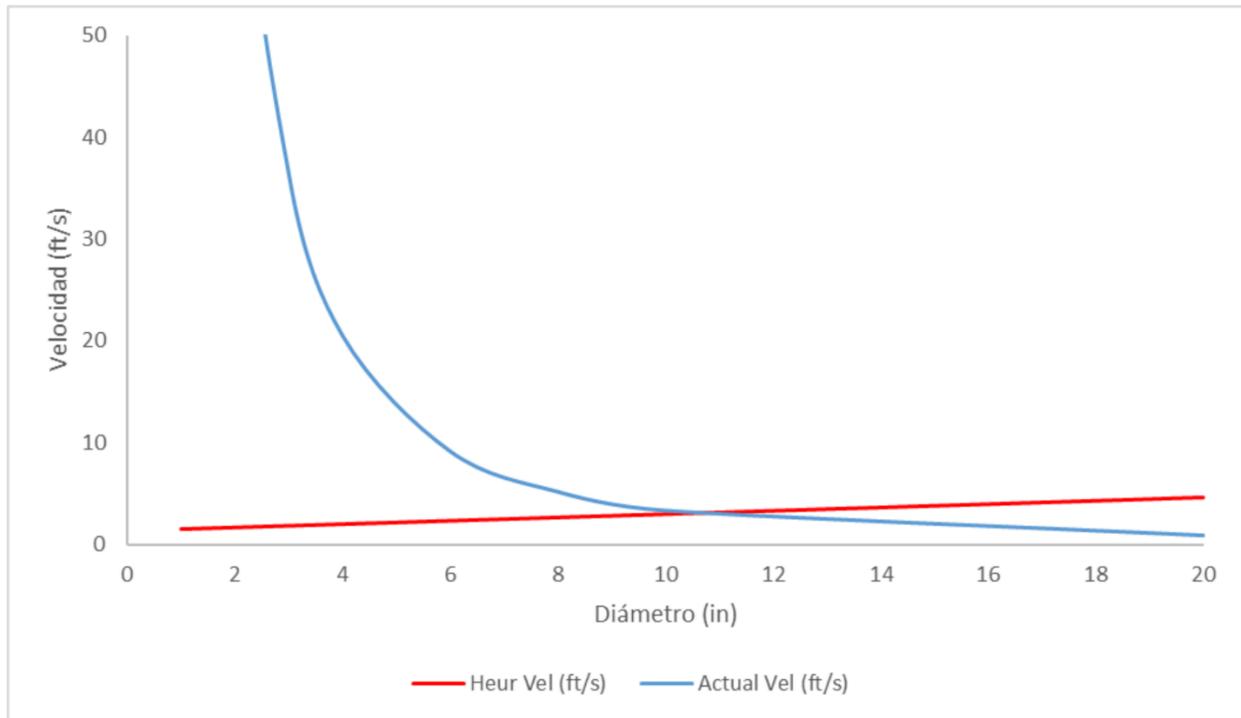
P&ID – Gráficas de selección de diámetros de tuberías (Pool IN).



Nota. El punto de cruce es el diámetro de tubería óptimo, redondeando para arriba, 19”.

Figura 123.

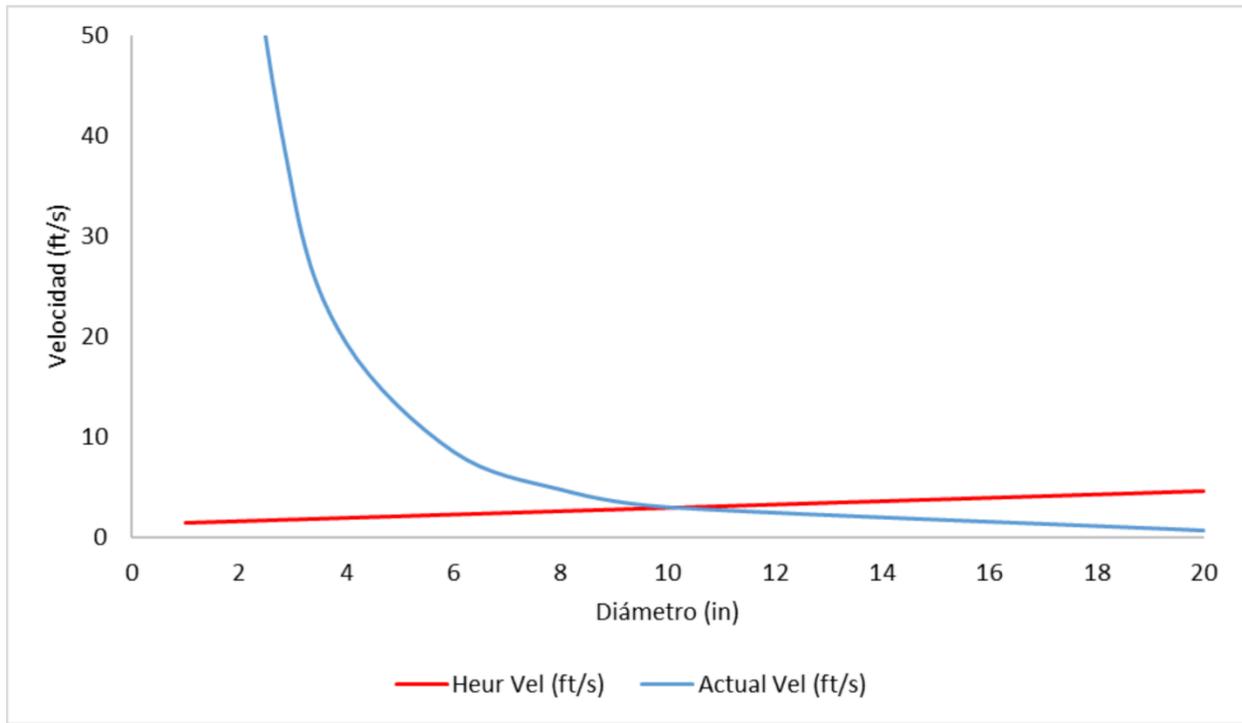
P&ID – Gráficas de selección de diámetros de tuberías (Separators IN).



Nota. El punto de cruce es el diámetro de tubería óptimo, redondeando para arriba, 11”.

Figura 124.

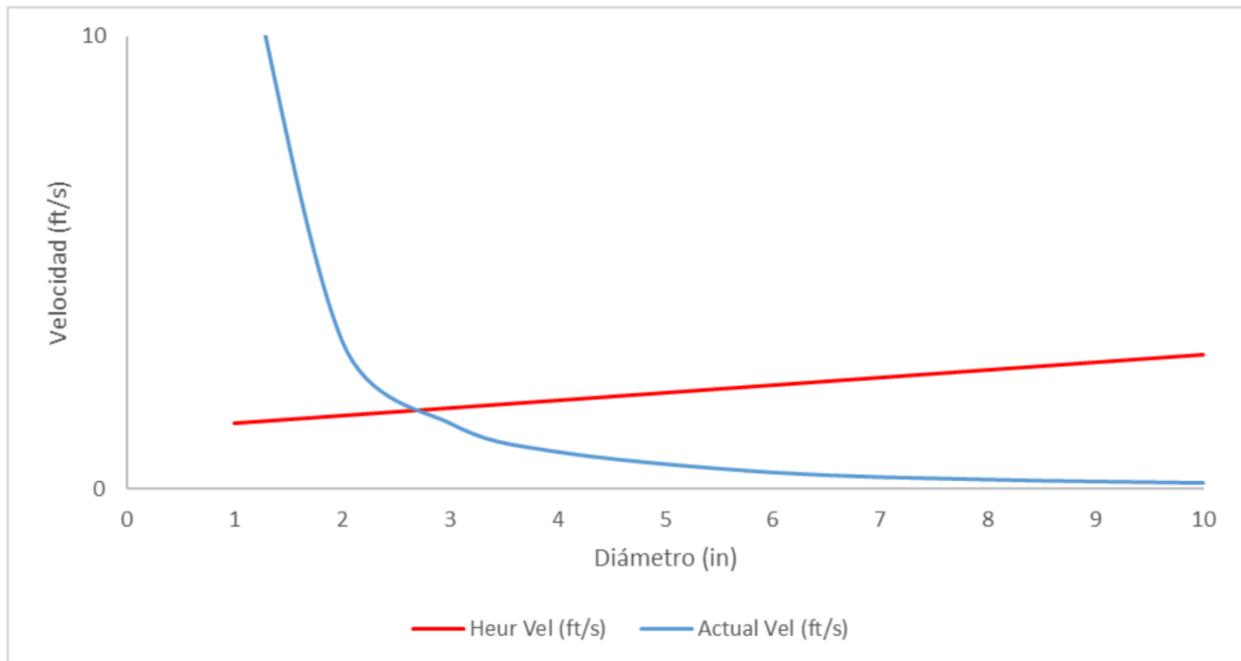
P&ID – Gráficas de selección de diámetros de tuberías (Separators WT OUT).



Nota. El punto de cruce es el diámetro de tubería óptimo, redondeando para arriba, 11”.

Figura 125.

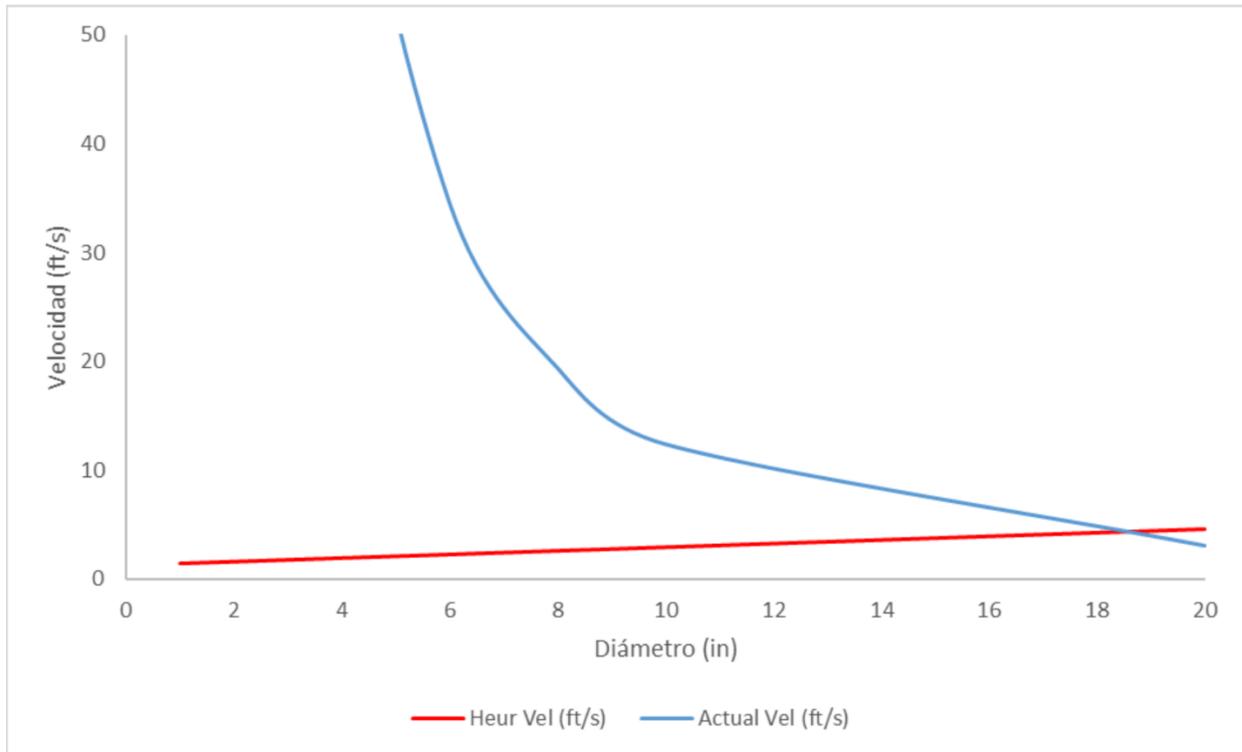
P&ID – Gráficas de selección de diámetros de tuberías (Separators OIL OUT y Reciclo Pool).



Nota. El punto de cruce es el diámetro de tubería óptimo, redondeando para arriba, 3”.

Figura 126.

P&ID– Gráficas de selección de diámetros de tuberías COAG/FLOC System y WT OUT).



Nota. El punto de cruce es el diámetro de tubería óptimo, redondeando para arriba, 19”.

ANEXO 4

FICHAS TÉCNICAS DE EQUIPOS PRINCIPALES

Tabla 27.

Tanque de almacenamiento TK-100.

HOJA DE ESPECIFICACIONES DE TANQUE DE ALMACENAMIENTO		TK-100	
Sustancias Manipuladas	Residuos sólidos, hidrocarburos, agua de mar		
CONDICIONES DE OPERACIÓN			
Presión de Diseño (KPa)	101,325		
Temperatura de operación (°C)	10		
DISEÑO BASE			
Altura (m)	2	Profundidad (m)	3
Longitud (m)	3	Volumen (m ³)	18
MISCELÁNEOS			
Norma de Diseño	Norma ASME		
Material	Acero inoxidable		
Notas	Necesario un buen sistema de ventilación		

Nota. Diseño de tabla simplificado.

Tabla 28.*Tanque de almacenamiento TK-101.*

HOJA DE ESPECIFICACIONES DE TANQUE DE ALMACENAMIENTO		TK-101	
Sustancias Manipuladas	Hidrocarburos, Agua de mar		
CONDICIONES DE OPERACIÓN			
Presión de Diseño (KPa)	101,325		
Temperatura de operación (°C)	10		
DISEÑO BASE			
Altura (m)	2	Profundidad (m)	7
Longitud (m)	15	Volumen (m ³)	210
MISCELÁNEOS			
Norma de Diseño	Norma ASME		
Material	Acero inoxidable		
Notas	Necesario un buen sistema de ventilación		

Nota. Diseño de tabla simplificado.

Tabla 29.*Tanque de alimentación por gravedad TK-102.*

HOJA DE ESPECIFICACIONES DE TANQUE DE ALIMENTACIÓN POR GRAVEDAD		TK-102	
Sustancias Manipuladas	Coagulante/Floculante		
CONDICIONES DE OPERACIÓN			
Presión de Diseño (KPa)	101,325		
Temperatura de operación (°C)	10		
DISEÑO BASE			
Altura (m)	1	Profundidad (m)	3
Longitud (m)	2	Volumen (m ³)	6
MISCELÁNEOS			
Norma de Diseño	Norma ASME		
Material	Acero inoxidable		
Notas	Necesario un buen sistema de ventilación		

Nota. Diseño de tabla simplificado.

Tabla 30.*Tanque Pool V-100.*

HOJA DE ESPECIFICACIONES DE TANQUE (POOL)		V-100	
Sustancias Manipuladas	Hidrocarburos, Agua de mar		
CONDICIONES DE OPERACIÓN			
Presión de Diseño (KPa)	101,325		
Temperatura de operación (°C)	10		
DISEÑO BASE			
Altura (m)	4	Profundidad (m)	4
Longitud (m)	4	Volumen (m ³)	64
MISCELÁNEOS			
Norma de Diseño	Norma ASME		
Material	Acero inoxidable		
Notas	Necesario un buen sistema de ventilación		

Nota. Diseño de tabla simplificado.

Tabla 31.*Tanque de recolección V-101.*

HOJA DE ESPECIFICACIONES DE TANQUE DE RECOLECCIÓN		V-101	
Sustancias Manipuladas	Hidrocarburos, Agua de mar		
CONDICIONES DE OPERACIÓN			
Presión de Diseño (KPa)	101,325		
Temperatura de operación (°C)	10		
DISEÑO BASE			
Altura (m)	3	Profundidad (m)	8
Longitud (m)	2	Volumen (m ³)	48
MISCELÁNEOS			
Norma de Diseño	Norma ASME		
Material	Acero inoxidable		
Notas	Necesario un buen sistema de ventilación		

Nota. Diseño de tabla simplificado.

Tabla 32.*Tanque de floculación V-102.*

HOJA DE ESPECIFICACIONES DE TANQUE DE FLOCULACIÓN		V-102	
Sustancias Manipuladas	Hidrocarburos, Agua de mar, Floculante/Coagulante		
CONDICIONES DE OPERACIÓN			
Presión de Diseño (KPa)	101,325		
Temperatura de operación (°C)	10		
DISEÑO BASE			
Altura (m)	4	Profundidad (m)	8
Longitud (m)	4	Volumen (m ³)	128
MISCELÁNEOS			
Norma de Diseño	Norma ASME		
Material	Acero inoxidable		
Notas	Necesario un buen sistema de ventilación		

Nota. Diseño de tabla simplificado.

Tabla 33.*Separador S-100.*

HOJA DE ESPECIFICACIONES DE SEPARADOR		S-100	
Sustancias Manipuladas	Hidrocarburos, Agua de mar		
CONDICIONES DE OPERACIÓN			
Presión de Diseño (KPa)	101,325		
Temperatura de operación (°C)	10		
DISEÑO BASE			
Altura (m)	2,5	Profundidad (m)	1
Longitud (m)	5,15	Volumen (m ³)	128
# deflectores verticales	5	# deflectores horizontales	3
# salidas de aceite	1	# salidas de agua	3
# salidas de ventilación	2	# desagües de mantenimiento	4
MISCELÁNEOS			
Norma de Diseño	Norma ASME		
Material	Acero inoxidable		
Notas	Presencia de micropelículas hidrofílicas, hidrofóbicas, oleofílicas y oleofóbicas internas para facilitar manipulación de flujo, mejorando separación		

Nota. Diseño de tabla simplificado.

Tabla 34.*Separador S-101.*

HOJA DE ESPECIFICACIONES DE SEPARADOR		S-101	
Sustancias Manipuladas	Hidrocarburos, Agua de mar		
CONDICIONES DE OPERACIÓN			
Presión de Diseño (KPa)	101,325		
Temperatura de operación (°C)	10		
DISEÑO BASE			
Altura (m)	2,5	Profundidad (m)	1
Longitud (m)	5,15	Volumen (m ³)	128
# deflectores verticales	5	# deflectores horizontales	3
# salidas de aceite	1	# salidas de agua	3
# salidas de ventilación	2	# desagües de mantenimiento	4
MISCELÁNEOS			
Norma de Diseño	Norma ASME		
Material	Acero inoxidable		
Notas	Presencia de micropelículas hidrofílicas, hidrofóbicas, oleofílicas y oleofóbicas internas para facilitar manipulación de flujo, mejorando separación		

Nota. Diseño de tabla simplificado.

Tabla 35.

Separador S-102.

HOJA DE ESPECIFICACIONES DE SEPARADOR		S-102	
Sustancias Manipuladas		Hidrocarburos, Agua de mar	
CONDICIONES DE OPERACIÓN			
Presión de Diseño (KPa)		101,325	
Temperatura de operación (°C)		10	
DISEÑO BASE			
Altura (m)	2,5	Profundidad (m)	1
Longitud (m)	5,15	Volumen (m ³)	128
# deflectores verticales	5	# deflectores horizontales	3
# salidas de aceite	1	# salidas de agua	3
# salidas de ventilación	2	# desagües de mantenimiento	4
MISCELÁNEOS			
Norma de Diseño		Norma ASME	
Material		Acero inoxidable	
Notas		Presencia de micropelículas hidrofílicas, hidrofóbicas, oleofílicas y oleofóbicas internas para facilitar manipulación de flujo, mejorando separación	

Nota. Diseño de tabla simplificado.

Tabla 36.*Separador S-103.*

HOJA DE ESPECIFICACIONES DE SEPARADOR		S-103	
Sustancias Manipuladas	Hidrocarburos, Agua de mar		
CONDICIONES DE OPERACIÓN			
Presión de Diseño (KPa)	101,325		
Temperatura de operación (°C)	10		
DISEÑO BASE			
Altura (m)	2,5	Profundidad (m)	1
Longitud (m)	5,15	Volumen (m ³)	128
# deflectores verticales	5	# deflectores horizontales	3
# salidas de aceite	1	# salidas de agua	3
# salidas de ventilación	2	# desagües de mantenimiento	4
MISCELÁNEOS			
Norma de Diseño	Norma ASME		
Material	Acero inoxidable		
Notas	Presencia de micropelículas hidrofílicas, hidrofóbicas, oleofílicas y oleofóbicas internas para facilitar manipulación de flujo, mejorando separación		

Nota. Diseño de tabla simplificado.

ANEXO 5

RECOMENDACIONES

Diseño del equipo

- Si se tuviese mucho más tiempo se hubiese optado por seguir experimentando más diseños que obtuvieran mejores *pathlines*. Adicionalmente, para cada uno de los diseños propuestos se podría hacer la experimentación para determinar si realmente son todos diseños fallidos o si sólo eran fallidos en las condiciones inicialmente establecidas.
- Con mejor hardware se sugiere llevar a cabo el experimento en 3D.

Simulación CFD

- La simulación se realizó con aproximadamente 5000 celdas, mayor cantidad proveería mayor precisión.
- La discretización de las ecuaciones se realizó en su mayoría de primer nivel para ahorrar recursos computacionales, se sugiere evaluar con discretización de segundo y/o tercer nivel.

Diseño de planta

- Evaluar, tal vez mediante otra simulación, la efectividad del sistema de coagulación/floculación.
- Evaluar mediante experimentos la efectividad del filtro plisado.
- Confirmar funcionamiento del lazo de control especial.
- Examinar viabilidad del sistema de mantenimiento de planta propuesto.
- Evaluar disposición de equipos para maximizar aprovechamiento de espacio.