



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Mecánica

**DISEÑO DE UN TANQUE PREPURIFICADOR DE PETRÓLEO LIVIANO DE
36 GRADOS API**

Tomás Ricardo Irving Valladares

Asesorado por el Ing. Jorge Iván Cifuentes Castillo

Guatemala, septiembre de 2019

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**DISEÑO DE UN TANQUE PREPURIFICADOR DE PETRÓLEO LIVIANO DE
36 GRADOS API**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA

POR

TOMÁS RICARDO IRVING VALLADARES

ASESORADO POR EL ING. JORGE IVÁN CIFUENTES CASTILLO

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO MECÁNICO

GUATEMALA, SEPTIEMBRE DE 2019

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANA	Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada
VOCAL I	Ing. José Francisco Gómez Rivera
VOCAL II	Ing. Mario Renato Escobedo Martínez
VOCAL III	Ing. José Milton de León Bran
VOCAL IV	Br. Luis Diego Aguilar Ralón
VOCAL V	Br. Christian Daniel Estrada Santizo
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
EXAMINADOR	Ing. Esdras Feliciano Miranda Orozco
EXAMINADOR	Ing. Carlos Enrique Chicol Cabrera
EXAMINADOR	Ing. Roberto Guzmán Ortíz
SECRETARIA	Inga. Lesbia Magali Herrera López

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

DISEÑO DE UN TANQUE PREPURIFICADOR DE PETRÓLEO LIVIANO DE 36 GRADOS API

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Mecánica, con fecha marzo de 2017.



Tomás Ricardo Irving Valladares



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería

ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA
Edificio T-7, Ciudad Universitaria, zona 12
Guatemala, Centroamérica
Teléfono directo: (502) 2418-9133
<http://emecanica.ingenieria.usac.edu.gt/sitio/>
Correo electrónico: emecanica@ing.usac.edu.gt

Guatemala, 6 de mayo de 2019

A quien interese,

Por este medio hago constar que he revisado en su totalidad el trabajo de graduación titulado: **DISEÑO DE TANQUE PRE-PURIFICADOR DE PETRÓLEO LIVIANO DE 36 GRADOS API** desarrollado por el estudiante **TOMÁS RICARDO IRVING VALLADARES**, CUI 2284908470101 con Reg. Académico No. 201020718,

Con base a lo anterior, recomiendo su aprobación y por ende puede pasar a ser revisada por el Coordinador del Área de Diseño de Ingeniería de la Escuela de Ingeniería Mecánica.

Atentamente,

Jorge Ivan Cifuentes Castillo

MSc. Ingeniero Mecánico

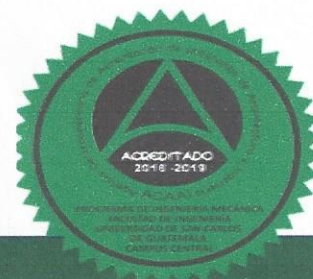
Asesor

UNIDAD DE INVESTIGACIÓN
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA

Jorge Ivan Cifuentes Castillo
Máster en Ciencias Ingeniero Mecánico
Colegiado No. 3413

PROGRAMA DE INGENIERÍA
MECÁNICA ACREDITADO POR
Agencia Centroamericana de Acreditación de
Programas de Arquitectura y de Ingeniería
Periodo 2016 - 2019

50 AÑOS FORMANDO INGENIEROS MECÁNICOS





USAC

TRICENTENARIA
Universidad de San Carlos de Guatemala

Facultad de Ingeniería

Escuela de Ingeniería Mecánica

Ref.E.I.M.099.2019

El Coordinador del Área de Diseño de Ingeniería de la Escuela de Ingeniería Mecánica, luego de conocer el dictamen del Asesor y habiendo revisado en su totalidad el trabajo de graduación titulado: **DISEÑO DE TANQUE PRE-PURIFICADOR DE PETRÓLEO LIVIANO DE 36 GRADOS API** desarrollado por el estudiante **Tomás Ricardo Irving Valladares**, CUI **2284908470101** con Reg. Académico No. **201020718** recomienda su aprobación.

"Id y Enseñad a Todos"

Ing. Julio César Campos Paiz
Coordinador Área de Diseño
Escuela de Ingeniería Mecánica



Guatemala, abril 2019



USAC

TRICENTENARIA

Universidad de San Carlos de Guatemala

Facultad de Ingeniería

Escuela de Ingeniería Mecánica

Ref.E.I.M.220.2019

El Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica, de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer el dictamen del Asesor y con la aprobación del Coordinador del Área de Diseño del trabajo de graduación titulado: **DISEÑO DE UN TANQUE PREPURIFICADOR DE PETRÓLEO LIVIANO DE 36 GRADOS API** desarrollado por el estudiante **Tomás Ricardo Irving Valladares**, CUI **2284908470101** y Reg. Académico No. **201020718** y luego de haberlo revisado en su totalidad, procede a la autorización del mismo.

"Id y Enseñad a Todos"


Ing. Roberto Guzmán Ortiz
Director
Escuela de Ingeniería Mecánica



Guatemala, septiembre de 2019

/aej

Universidad de San Carlos
de Guatemala

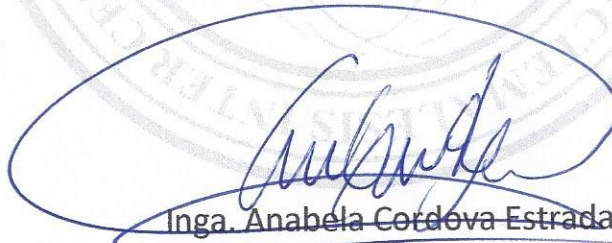


Facultad de Ingeniería
Decanato

DTG. 376.2019

El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica, al Trabajo de Graduación titulado: **DISEÑO DE UN TANQUE PREPURIFICADOR DE PETRÓLEO LIVIANO DE 36 GRADOS API**, presentado por el estudiante universitario: **Tomás Ricardo Irving Valladares**, y después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:



Inga. Anabela Cordova Estrada
Decana

Guatemala, septiembre de 2019

/gdech



ACTO QUE DEDICO A:

- Dios** Por ser una importante influencia en mi carrera, así mismo ser mi fortaleza y mi guía.
- Mis padres** Telma Valladares y Nicholas Irving. Por darme siempre su apoyo, amor incondicional y paciencia; por estar presentes y darme el empujón necesario para alcanzar mis metas.
- Mi hermano** Juan Luis Irving, por estar pendiente de mis logros y asegurarse que nunca deje nada pendiente, ya que el tiempo no perdona. Por impulsarme para lograr mis objetivos.
- Mis tíos** Por estar pendientes y recordarme que debo culminar mi carrera, por la importancia del título en la sociedad.

AGRADECIMIENTOS A:

Universidad de San Carlos de Guatemala	Por la oportunidad de ingresar y ser parte de una casa de estudios de alto prestigio.
Facultad de Ingeniería	Porque me enseñó que la perseverancia es una de mis virtudes.
Escuela de Ingeniería Mecánica	Por guiarme hasta culminar mi carrera soñada.
RIOSA	Por abrirme las puertas y brindarme el apoyo para culminar mi trabajo de graduación en sus instalaciones.
Ingeniero Jorge Cifuentes	Por brindar todo su apoyo desde inicio al fin de mi trabajo de graduación, guiarme y aconsejarme siempre.
Pueblo de Guatemala	Por pagar sus impuestos y no permitir que la Universidad de San Carlos sea privatizada.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	III
LISTA DE SÍMBOLOS	VII
GLOSARIO	IX
RESUMEN.....	XI
OBJETIVOS.....	XIII
INTRODUCCIÓN	XV
1. PROCESOS DE REDUCCIÓN DEL SULFURO DE HIDRÓGENO	1
1.1. Método de Claus	2
1.2. Óxidoreducción con quelatos de hierro	5
1.3. Oxidación con aire y ftalocianinas de cobalto.....	8
1.4. Tratamiento con solventes (dietanolamina).....	11
2. ELEMENTOS PARA TANQUE PREPURIFICADOR.....	13
2.1. Agitadores	15
2.2. Bomba	16
2.3. Codos	17
2.4. Deflectores	18
2.5. Faja	19
2.6. Medidor de flujo	20
2.7. Motor	21
2.8. Polea	22
2.9. Sensor de sulfuro de hidrógeno.....	22
2.10. Tanque cilíndrico	23
2.11. T	24

2.12.	Tubos	25
2.13.	Unión universal	25
2.14.	Válvula de salida	27
3.	CÁLCULOS PARA EL TANQUE.....	29
3.1.	Presión.....	31
3.2.	Grosor de la lámina inoxidable.....	33
3.3.	Normas API.....	35
3.3.1.	API 620.....	35
3.3.2.	API 650.....	35
3.4.	Configuración de deflectores.....	36
3.5.	Configuración de agitadores	37
3.6.	Potencia de motor	40
3.7.	Dimensiones de poleas.....	48
3.8.	Bomba.....	49
3.9.	Diseño final	50
4.	EXPERIMENTO Y RESULTADOS	63
4.1.	Análisis de datos	68
4.2.	Discusión de resultados	76
	CONCLUSIONES.....	79
	RECOMENDACIONES	81
	BIBLIOGRAFÍA.....	83
	ANEXOS.....	85

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Proceso Claus.....	4
2.	Proceso óxidoreducción con quelatos de hierro.....	7
3.	Proceso oxidación con aire y ftalocianinas de cobalto	10
4.	Tratamiento con solventes (dietanolamina).....	12
5.	Set de agitadores	15
6.	Bomba de 0,5 HP	16
7.	Codo de ½ pulgada de diámetro 90°	17
8.	Codos de 45°, ½ pulgada de diámetro que forman 90°	17
9.	Tanque sin deflectores.....	18
10.	Tanque con deflectores.....	19
11.	Cuenta galones	20
12.	Motor Siemens	21
13.	Polea estriada con cuñero.....	22
14.	Sensor de H ₂ S SensorCon.....	23
15.	T inoxidable ½ pulgada	24
16.	Varios tubos	25
17.	Unión universal desarmada.....	26
18.	Unión universal armada al 50 %	26
19.	Unión universal armada en su totalidad	27
20.	Válvula de bola.....	28
21.	Base de chumacera	50
22.	Diseño de base de puente	51
23.	Bomba centrífuga.....	51

24.	Chaqueta de tanque	52
25.	Deflectores.....	52
26.	Hélice para agitador.....	53
27.	Cuñero	53
28.	Motor con motorreductor.....	54
29.	Puente interno antioscilaciones	54
30.	Puente superior	55
31.	Tapadera de tanque	55
32.	Fondo de tanque.....	56
33.	Sistema de poleas y faja.....	56
34.	Tanque prepurificador.....	57
35.	Tanque prepurificador.....	58
36.	Tanque prepurificador vista superior	59
37.	Imagen de tanque prepurificador sin chaqueta.....	60
38.	Tanque prepurificador sin chaqueta	61
39.	Equipo utilizado en planta piloto	65
40.	Crudo Atzam 36 grados API	65
41.	Reactor piloto 12 galones	66
42.	Rreactor piloto con crudo Atzam y datos	67
43.	Bomba centrífuga	67
44.	Bombeo crudo 36 grados API.....	69
45.	Agitación rotor crudo 36 grados API	71
46.	Bombeo con agitación crudo 36 grados API.....	73
47.	Gráfica comparativa pruebas con crudo 36 Grados API	75
48.	Límites para exponerse ante el H ₂ S	85
49.	Resultados de análisis MEM ATZAM 36 Grados API	86

TABLAS

I.	Densidad de crudo 36 grados API y la formalina	30
II.	Descripción de factores y su relación.....	43
III.	Número de potencia con relación a deflectores y agitadores	44
IV.	Potencia de motor eléctrico trifásico	47
V.	Bombeo crudo 36 grados API	68
VI.	Agitación crudo 36 grados API.....	70
VII.	Bombeo con agitación crudo 36 grados API	72
VIII.	Tabla comparativa de pruebas con crudo 36 grados API.....	74

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
HP	Caballos de potencia
cm	Centímetros
Gal	Galones
°C	Grados Centígrados
°F	Grados Fahrenheit
Hz	Hertz
Kg	Kilogramo
Lb	Libras
psi	Libras por pulgada cuadrada
psig	Libras por pulgada cuadrada Gauge
m	Metro
mm	Milímetro
ppm	Partes por millón
%	Porcentaje
rph	Revoluciones por hora
rpm	Revoluciones por minuto
s	Segundo
H2S	Sulfuro de hidrógeno
V	Voltaje

GLOSARIO

Amina	Compuesto de nitrógeno y carbono.
Brida	Sección circular y plana al extremo de un tubo para atornillar a otro tubo.
Catalizador	Sustancia química que permite que ocurra una reacción.
Chumacera	Cojinete incorporado a una base atornillable.
Desulfurización	Remoción de azufre.
Dietanolamina	Amina para remover azufre.
Ftalocianinas	Complejo molecular de metales que funcionan como catalizadores.
Grados API	Medida de gravedad específica en el petróleo y sus derivados.
Manhole	Orificio de ingreso para dar servicio y mantenimiento a un tanque.
Quelato	Complejo molecular soluble en agua.

RESUMEN

En Guatemala existen diversos pozos de petróleo, pero la mayoría no son explotados por su alto contenido de agua, azufre, mercaptanos, sales y otros elementos, que, en el proceso de refinación, crean obstáculos para producir combustibles varios. Por ende, el petróleo es solamente extraído y generalmente exportado fuera del país para su refinación. El resto es utilizado para crear chapopote (asfalto) y búnker.

Como se sabe, un sistema de agitación es eficiente, si y solamente si se homogenizan los elementos. Por ende, es de suma importancia. Se logra al combinar un bombeo de circulación interna con un agitador eficaz movido con una polea y fuerza motriz, que dirige el flujo hacia los deflectores. El petróleo constantemente es extraído del fondo cónico del tanque y retorna bombeado por la parte superior; dicho caudal mueve los agitadores. El sistema de agitación con retorno es de particular interés en el diseño del tanque, el cual debe ser cerrado por tratarse de un contaminante gaseoso. Las dimensiones y fondo son factores determinantes en el proceso. Al elaborar el diseño se haría con acero inoxidable, por la alta corrosividad del elemento por tratar.

OBJETIVOS

General

Diseñar un tanque prepurificador de petróleo liviano de 36 grados API.

Específicos

1. Determinar los procesos actuales para el diseño de tanques prepurificadores.
2. Definir elementos necesarios para prepurificar un petróleo liviano.
3. Calcular las dimensiones del tanque con un diseño adecuado.
4. Demostrar la eficacia del diseño con tablas de reducción de sulfuro de hidrogeno.

INTRODUCCIÓN

Con el paso de los años, la industria del petróleo ha sufrido cambios, tanto en los precios como en el proceso de refinación y sus usos generales. Anteriormente, el petróleo crudo era utilizado únicamente en refinerías; sin embargo, actualmente es prepurificado sin ser formalmente refinado en su más baja formación, y luego vendido por los productores como búnker. Es usado en calderas, diversos quemadores, flotillas marítimas, entre otros. Debido a su proceso de destilación (bajas temperaturas y costo barato) y su baja viscosidad se ha convertido en una opción económica para la industria.

El petróleo crudo tiene un serio problema ambiental de toxicidad inmediata, ya que contiene una cantidad excesivamente alta de gas H_2S disuelto y esto genera restricciones en el transporte. Existen varias metodologías establecidas para tratar el problema del H_2S y todas funcionan relativamente bien; sin embargo, persiste aún hoy un problema con la agitación en los tanques de tratamiento en los campos petroleros. El petróleo puede ser transportado por oleoducto o por camión cisterna, siempre y cuando su nivel de H_2S lo permita. La industria en general permite hasta 20 ppm de H_2S , aunque en condiciones limitadas es permisible 50 ppm. La presente tesis trata sobre el procedimiento mecánico de la agitación, indistintamente de la metodología y proceso que involucra la parte de ingeniería química y petrolera.

Al purificar el petróleo de sustancias como el sulfuro de hidrógeno, se contribuye a la reducción de riesgos por toxicidad, se controlan los costos de producción y mantenimiento. Además, se reduce la corrosividad del petróleo, pues el H_2S daña las calderas y el equipo. Todo ello, en conjunto, da como

resultado una producción más limpia y mayores ganancias para la empresa, sin requerir una costosa inversión de capital. Al lograr lo anterior, también se podrá obtener mayores fondos para invertir y refinar el petróleo liviano, y producir no solo búnker sino también diésel y nafta, la cual, junto con los aditivos y aromáticos adecuados, forma gasolina.

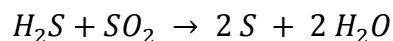
1. PROCESOS DE REDUCCIÓN DEL SULFURO DE HIDRÓGENO

Desde el inicio de la era de la extracción del petróleo, el proceso de refinación ha tenido diferentes giros en busca de obtener la mayor ganancia y brindar más opciones a diversos clientes. El primer uso que se le dio fue la extracción del keroseno, ya que fue utilizado para las lámparas que solían alumbrar las calles de las ciudades. Con el tiempo, surgieron los automóviles y se descubrió que había otras ventajas. Estas llevaron a que la refinación de petróleo ya no fuera solamente para obtener keroseno, sino también lo que ahora se conoce como gasolina, diésel e incluso búnker, las cuales son algunas de las principales fuentes de energía utilizadas actualmente. Con el tiempo no solamente fueron descubiertos nuevos usos y ventajas, sino también un detalle que perjudicaba la combustión de los subproductos del petróleo: el sulfuro de hidrógeno. Este gas no causaba problemas únicamente en la combustión; también se observó que había daños en los equipos, causados por la corrosión que provocaba. Eventualmente, las empresas tuvieron que realizar grandes gastos por reparaciones y mantenimientos correctivos en el equipo. Debido a esto, con el pasar de los años se ingeniaron diversas formas reducir e incluso eliminar el del gas pernicioso encontrado en los derivados del petróleo.

No todos los petróleos son iguales, la cantidad de sulfuro de hidrógeno en cuanto a partes por millones varía según el tipo de petróleo. Lo que se mantiene constante es el nivel de riesgo que dicho gas da a los equipos, al ser humano y a los subproductos refinados.

1.1. Método de Claus

El método de Claus fue patentado en 1883 y hasta la fecha ha sido el más eficiente para la reducción del H_2S , dado que puede eliminar hasta un 98 %. Se trata de un proceso químico con catalizadores para convertir el hidrógeno de sulfuro (H_2S) a un azufre elemental (S). Se le conoce usualmente como proceso de recuperación de azufre; es altamente cotizado y utilizado en grandes refinerías. La reacción química general para la remoción del gas pernicioso es la siguiente:



Para llevar a cabo el proceso y los cambios químicos, es necesario el uso de diversos catalizadores. El más utilizado es el óxido de aluminio, comúnmente llamando alúmina (Al_2O_3). Otro catalizador empleado para este proceso es el dióxido de titanio (TiO_2); una gran ventaja de este en comparación a la alúmina, es que posee mayor resistencia con el envejecimiento del catalizador al momento de estar en contacto con el calor y mayor actividad de hidrólisis.

En conjunto con los diversos catalizadores, se requiere el uso de grandes y costosos equipos, ya que las presiones que se deben alcanzar oscilan cerca de los 22 psi y las temperaturas varían hasta los 1 000°C.

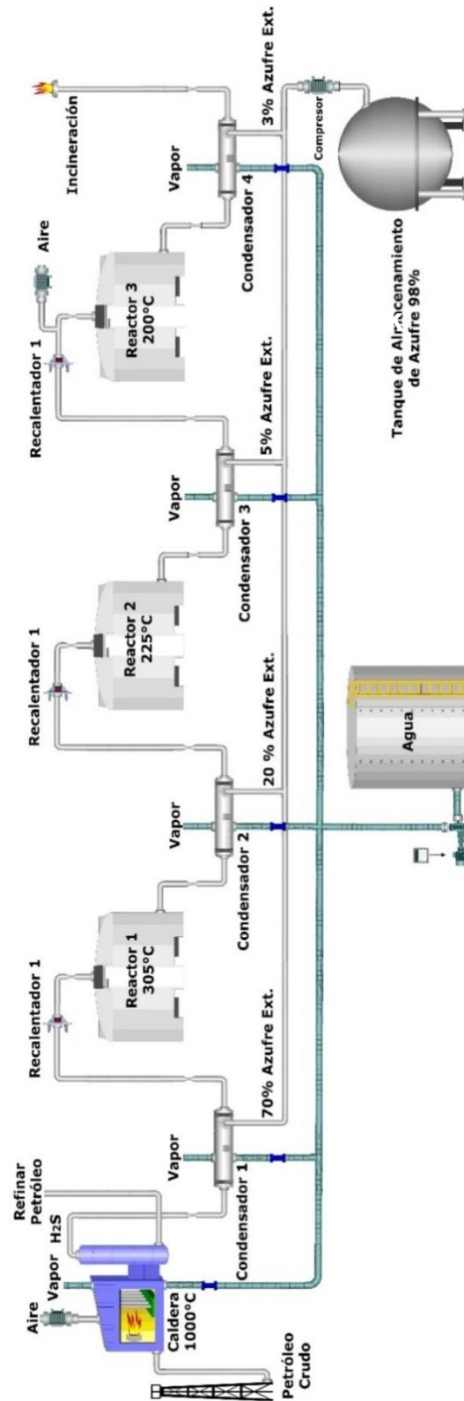
El método de Claus funciona de la siguiente manera:

- El gas es ingresado hacia un quemador para elevar la temperatura hasta unos 1 000°C y una presión de 22 psi. En esas condiciones, la reacción Claus ocurre térmicamente. Cuando está el gas dentro del quemador se ingresa agua que provoca la salida de vapor, con el fin de mantener las condiciones óptimas del proceso. Al finalizar la primera etapa,

aproximadamente el 70 % del H_2S que había al inicio, ha sido convertido en azufre gracias a los cambios provocados en sus propiedades.

- El gas extraído de la reacción caliente contiene azufre gaseoso y se utiliza para producir vapor en una caldera (caldera de calor residual), lo que se traduce en el enfriamiento de los gases. Adicionalmente, el gas es enfriado y se condensa en un intercambiador de calor. El azufre líquido condensado se separa del gas sin reaccionar que ha quedado en el extremo de salida del condensador y se envía al almacenamiento del producto.
- El gas separado es recalentado nuevamente y entra a su primer reactor con el catalizador por utilizar. Dicho reactor se debe mantener a una temperatura de $305\text{ }^\circ\text{C}$, donde un 20 % del hidrógeno de azufre se convierte en azufre puro. Una vez más, el azufre líquido condensado se separa del gas sin reaccionar que ha quedado en el extremo de salida del condensador y se envía al almacenamiento del producto.
- El gas separado del segundo condensador se envía a otro recalentador. La secuencia de recalentamiento de gas, la reacción catalítica, la condensación y separación de azufre líquido del gas que no ha reaccionado se repiten para el segundo y tercer reactor. El segundo reactor trabaja a $225\text{ }^\circ\text{C}$ y el tercero, a $200\text{ }^\circ\text{C}$. En este punto, aproximadamente entre el 3 % y 5 % del H_2S en el gas de alimentación se convierte térmicamente en azufre elemental. Para una planta bien diseñada y operada, si se utiliza el método de Claus para la recuperación de azufre, incluyendo los tres reactores catalíticos mencionados, se estima que se puede lograr una conversión global de al menos 98% del hidrógeno de sulfuro inicial.

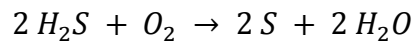
Figura 1. **Proceso Claus**



Fuente: elaboración propia, Programa SmartDraw.

1.2. Óxidoreducción con quelatos de hierro

El método de óxido-reducción con quelatos de hierro se originó a mediados de los años 60. Se emplea hierro con un agente llamado *quelato* (EDTA), el cual logra que el hierro se active con aire. Este proceso puede remover hasta un 98,7 % del H₂S. Su reactivo principal es el aire, por lo que es un método económico. La reacción química general para la remoción del gas pernicioso es la siguiente:



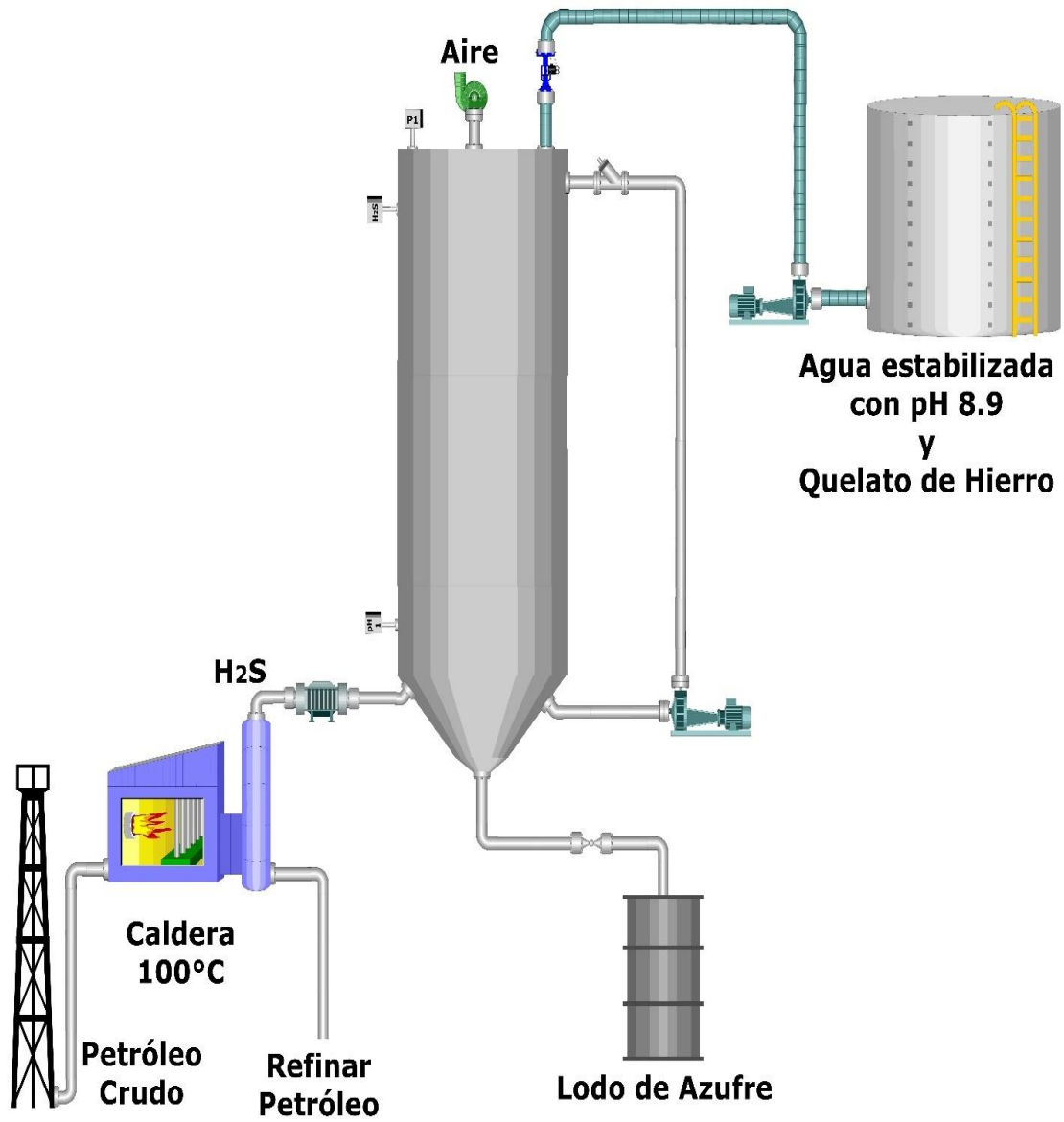
Una de las desventajas de utilizar este proceso es que el hierro se transforma en óxido en poco tiempo. Para la reacción de óxido-reducción el reactivo esencial es el aire, el cual contiene una gran cantidad de oxígeno, que provoca que el hierro se corroa fácilmente. Los quelatos de hierro, al entrar en contacto con el H₂S, quedan desactivados; pero al entrar en contacto con el aire, inmediatamente se activan y se vuelve un proceso cíclico hasta que el hierro se oxida. Finalmente, el proceso es costoso debido a que requiere agregar quelatos de hierro constantemente para mantener el proceso eficiente.

Para utilizar este proceso se necesita de una caldera que pueda elevar la temperatura del petróleo crudo hasta liberar el gas maligno, que es el H₂S. En este caso, se necesita elevar la caldera a una temperatura de 100 °C para trasegar el H₂S hacia un tanque desulfurizador. El resto del petróleo permanece en el reactor y se trasiega a otra sección de la refinería para ser procesado y convertido en sus subproductos. Una vez separado todo, el gas se lleva a un tanque grande para ser tratado.

Los pasos para purificar el H₂S son los siguientes:

- Llenar el tanque con agua. Es estabilizado con pH 8,9 y se le agrega 1 % de quelatos de hierro
- El aire ingresa por la parte superior del tanque por un soplador de caracol.
- Una vez el tanque está a su nivel de agua y con el pH indicado, se abre una válvula y se deja ingresar el H₂S por la parte inferior. Se crea un sistema de recirculación con una bomba para mezclar todo a la perfección y así atrapar al gas maligno y separar el azufre.
- El H₂S se transforma en azufre puro y agua por la acción de los quelatos de hierro activados con el aire. Eventualmente, el azufre se transforma en un lodo que se drena por un cono inferior del tanque, y se puede utilizar en la agricultura como fertilizante.
- Se drena el azufre para poder seguir tratando el gas y continuar con el proceso de purificación.
- Al momento de drenar todo, se debe limpiar el tanque y volver a llenar con quelatos de hierro, dado que estos se oxidan, pierden su vida útil y, por ende, no tendrán el mismo efecto purificador.

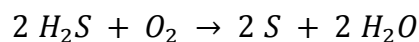
Figura 2. **Proceso Óxidoreducción con quelatos de hierro**



Fuente: elaboración propia, Programa SmartDraw

1.3. Oxidación con aire y ftalocianinas de cobalto

El proceso de oxidación con aire y ftalocianinas de cobalto es un proceso creado en 1970, cuando se observó que la ftalocianina de cobalto se activaba con aire. Fue categorizado como un método económico para tratar el H₂S en comparación con el método de Claus. Este proceso puede remover hasta un 98 % del H₂S; su reactivo principal es el aire, al igual que el método de óxido-reducción con quelatos de hierro. La reacción química general para la remoción del gas pernicioso es la siguiente:



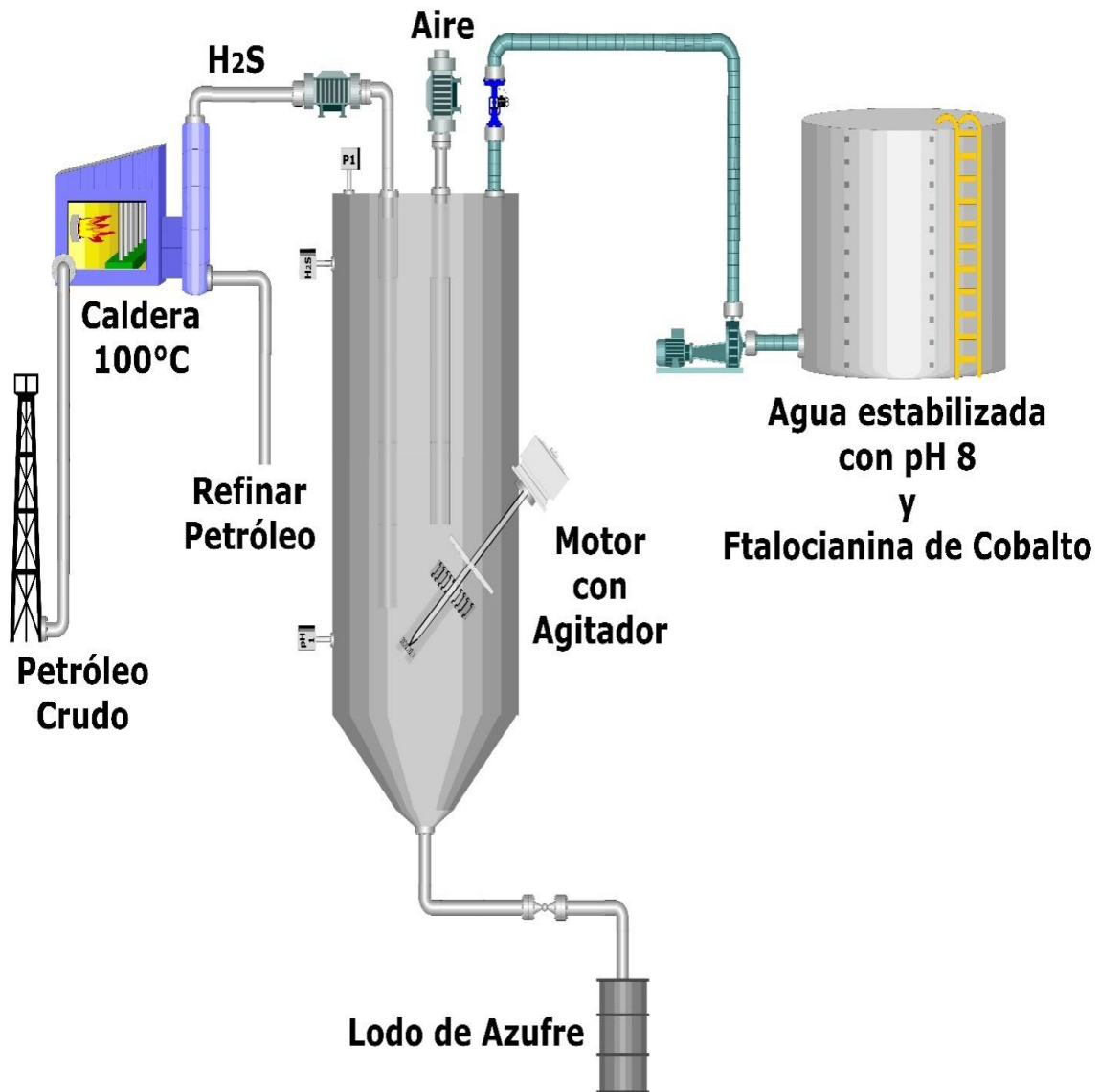
Una de sus peculiaridades y aspectos que conviene considerar en este proceso, es que la ftalocianina de cobalto se reactiva constantemente con el aire, así que no se altera ni se destruye, por lo que es un catalizador reusable. La ftalocianina reactivada reacciona instantáneamente con el H₂S y de nuevo con presencia del aire, se reactiva indefinidamente para seguir eliminado el gas maligno.

Para utilizar este proceso se necesita una caldera que eleve la temperatura del petróleo crudo hasta liberar el gas de H₂S. Se debe elevar a 100 °C para separar lo volátil (que es el gas) y trasegarlo hacia un tanque desulfurizador. El resto del petróleo permanece en el reactor y se trasiega a otra sección de la refinería para ser procesado y convertido en sus subproductos. Una vez separado todo, el gas se lleva a un tanque (diez veces más pequeño que uno para quelatos de hierro) para ser tratado.

Los pasos para purificar el H₂S son los siguientes:

- El tanque es llenado con agua, estabilizado a un pH8 y se le agregan 250 ppm de ftalocianina de cobalto.
- El aire ingresa al tanque por un compresor, a través de un tubo, hacia el dispersor de burbujas.
- Una vez el tanque está a su nivel de agua y con el pH indicado, se abre una válvula y se deja ingresar el H₂S por la parte superior. Se conduce hasta el fondo a través de un tubo hasta donde entra en contacto con el agitador, burbujas de aire y la ftalocianina.
- El H₂S se transforma en azufre puro y agua por la acción de ftalocianina de cobalto activada con el aire. Eventualmente, el azufre se transforma en un lodo que se drena por un cono inferior del tanque, el cual se puede utilizar en la agricultura como fertilizante.
- Se drena el azufre para seguir tratando el gas y continuar con el proceso de purificación.

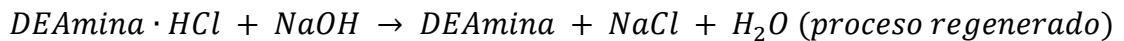
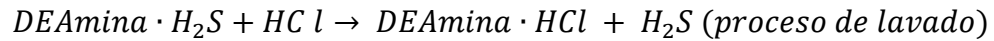
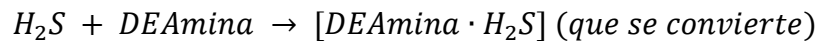
Figura 3. **Proceso oxidación con aire y ftalocianinas de cobalto**



Fuente: elaboración propia, Programa SmartDraw.

1.4. Tratamiento con solventes (dietanolamina)

Este tratamiento empezó en la Segunda Guerra Mundial y es básicamente un lavado directo del petróleo. No es necesario calentar y separar el gas volátil, como en los procesos mencionados. La reacción química general para la remoción del gas pernicioso es la siguiente:



Para utilizar este proceso se necesitan varios tanques: uno para lavado del petróleo; otro, para separar el petróleo limpio con la dietanolamina sucia, y un tercero para regenerar la dietanolamina en dos etapas (una con HCl y otra con NaOH). Una gran desventaja de este sistema es que es altamente ineficiente dado que la dietanolamina es cara y, asimismo, no elimina el H₂S. Solamente lo separa del petróleo para posteriormente utilizar uno de los procesos mencionados y, de esta forma, eliminar por completo el H₂S.

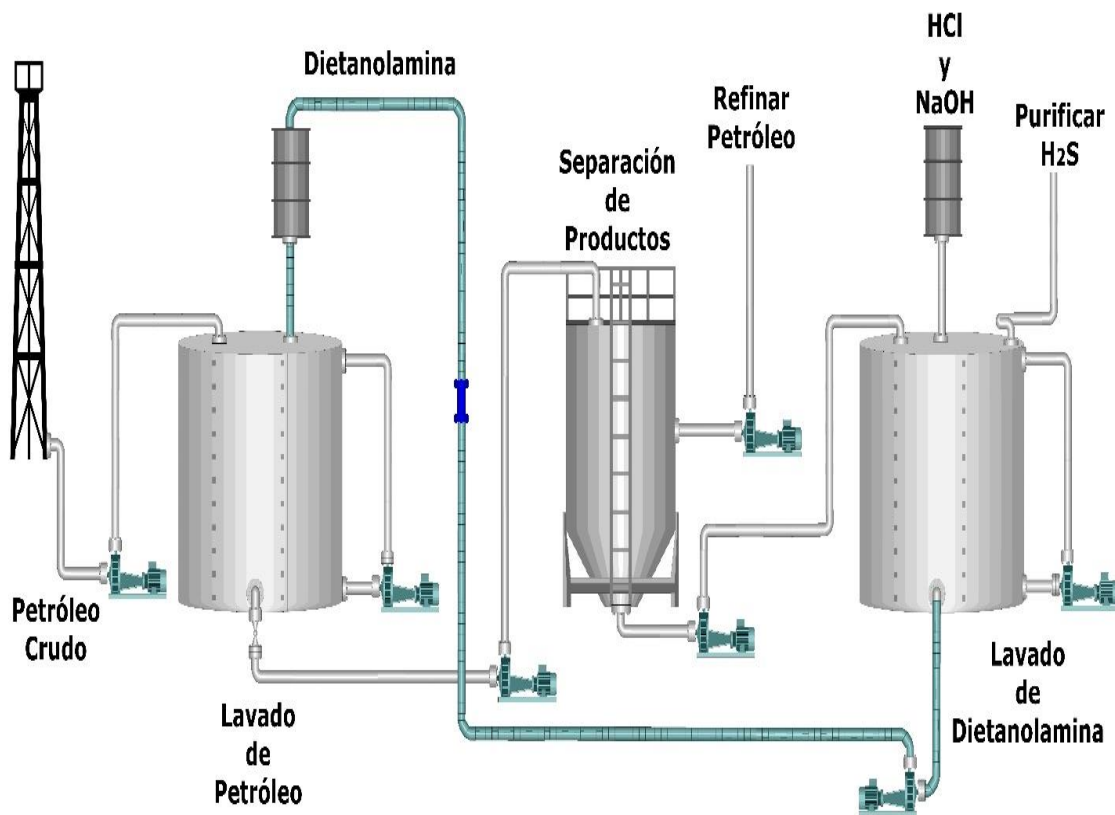
Los pasos para separar el H₂S son los siguientes:

- El primer tanque se llena con dietanolamina a la mitad de su altura y se completa con petróleo crudo el resto del tanque. Se recircula con una bomba para mezclar bien los dos componentes y así atrapar el H₂S.
- Se trasiega el petróleo lavado hacia un segundo tanque para esperar a que se separe. La parte superior del petróleo es la parte limpia que se puede refinar y de la cual obtener diversos productos. La parte que

queda en el fondo es la dietanolamina sucia, que después es trasegada a un tercer tanque.

- La cola pesada se lleva a un tercer tanque donde es regenerada la dietanolamina. Se extrae el H_2S para posteriormente ser tratado y eliminado por completo. La dietanolamina se vuelve a rehusar en el tanque uno.

Figura 4. Tratamiento con solventes (dietanolamina)



Fuente: elaboración propia, Programa SmartDraw.

2. ELEMENTOS PARA TANQUE PREPURIFICADOR

Un estudio de los diferentes sistemas mencionados reveló que son altamente elaborados y caros. Debido a los cambios erráticos en el precio del petróleo, no es rentable invertir en procesos con estas características. Por tal razón se han investigado diversos reactivos para tratar el petróleo crudo liviano y cómo purificarlo del H₂S para procesar más petróleo y obtener subproductos más baratos.

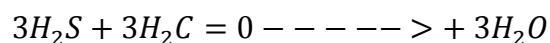
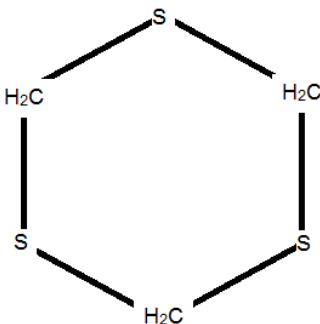
El proceso encontrado es con formaldehído. Es un proceso fácil y económico, que reacciona directamente con el H₂S cuando está disuelto en el petróleo. No requiere de calentamiento previo del petróleo crudo; solamente necesita agitación y circulación constante.

Por la cantidad tan pequeña de formalina que se agrega, no es necesario remover el remanente de este producto del crudo. Esto se debe a que, en la reacción química con el petróleo crudo, al mezclarse todo, se convierte en agua una triazina (-SCH₂-)₃. Cuando llega el momento de refinar el petróleo, el remanente que atrapó al H₂S simplemente se evapora por las altas temperaturas.

Para establecer qué equipo es necesario para procesar el petróleo crudo liviano de 36 grados API, es necesario comprender cómo funciona el proceso en pequeña escala. Primero se calcula el contenido máximo de H₂S en el petróleo crudo liviano; usualmente está hasta 2 000 ppm. Una vez calculado el contenido de H₂S, se agrega aproximadamente una parte de formalina (la formalina es formaldehído al 37 % de agua con alcohol) por cada 1 000 partes

de petróleo. El petróleo con dicha solución agregada se debe mantener en agitación constante durante 24 a 48 horas. El movimiento debe ser lento para procurar el lavado completo. Se monitorea periódicamente el contenido de H₂S para ver el nivel en ppm y dentro del periodo de las 48 horas disminuirá a un nivel inferior de 10ppm. Es muy importante que baje debido que no solo es tóxico para el humano, sino que corroe las partes del equipo de refinación. Por sus propiedades químicas, el formaldehído forma triazina (un compuesto estable e inocuo con el H₂S) hace un proceso fácil sin necesidad de lavar posteriormente al tratado, dado que también se forma agua y al momento de refinar se convierte en vapor. El proceso se presta para crudos únicamente de baja viscosidad, donde resulta fácil mezclar soluciones acuosas y no acuosas.

La reacción química general para la remoción del gas pernicioso es la siguiente:



Por todo lo anterior, se puede comprender la naturaleza del equipo requerido para diseñar el tanque adecuado que permita purificar solamente petróleo liviano de 36 grados API. A continuación, se presenta el equipo requerido. Más adelante se explicará detalladamente el proceso con un diagrama y los cálculos para llegar al diseño final.

2.1. Agitadores

Los agitadores son simplemente un eje con aspas que se hacen girar con potencia motriz, o simplemente giran libremente al momento de verter cualquier líquido. Con el paso del tiempo, los agitadores han cambiado su diseño inicial en forma de triángulo, por los líquidos que mezcla y sus respectivas viscosidades. Existen diversos ángulos que se les dan a las aspas al momento de estar girando, para que mezclen de forma más eficiente y reducir tiempos. También hay de una o dos filas de aspas, dependiendo de la profundidad del tanque donde se encontrará el agitador. El agitador y sus componentes deben ser de acero inoxidable, ya que se trabaja con H_2S , el cual es altamente corrosivo.

Figura 5. **Set de agitadores**



Fuente: elaboración propia.

2.2. Bomba

Una bomba es un dispositivo que mueve los fluidos (líquidos o gases) o, a veces, suspensiones, por acción mecánica. Se pueden clasificar en tres grupos principales, de acuerdo con el método que utilizan para mover el fluido: ascensor directo, el desplazamiento y bombas de gravedad. Debido al tipo de líquido que se movilizará, la bomba debe tener sello especial en contra de la corrosión; así mismo, la mayoría de los ejes y sus componentes interiores deben ser de acero inoxidable. Las bombas están diseñadas para cada proceso en especial, porque todo líquido es diferente. Se debe hacer acorde el material necesario, ya sea acero inoxidable 304 o 316, entre otros. Pero si no se encuentra, se debe hacer una bomba con las especificaciones requeridas del material. Se debe contar con una amplia existencia de repuestos para darle mantenimiento preventivo y evitar que sea correctivo. Dicha bomba se utiliza para crear un flujo circulatorio dentro del reactor, que homogeniza la materia prima de una forma más eficiente. Además, se utilizará para trasegar el producto purificado a tanques de almacenamiento. El flujo será redirigido por una T.

Figura 6. **Bomba de 0,5 HP**



Fuente: elaboración propia.

2.3. Codos

Existen diversos ángulos para codos, pero para evitar golpe de ariete brusco en las curvas cerradas de 90°, es necesario utilizar dos de 45°. Ayudan también para re direccionar con mayor facilidad los tubos al hacerlos llegar con menos quiebres a su destino, ya sea una bomba o el tanque. Varían de tamaño de diámetro, dependiendo del tubo que se utilizará para las conexiones y las bridas necesarias. Pueden ser desde ½ pulgada hasta 14 pulgadas de diámetro. Dentro de esas medidas existen codos de radio largo, radio medio y radio corto.

Figura 7. **Codo de ½ pulgada de diámetro 90°**



Fuente: elaboración propia.

Figura 8. **Codos de 45°, ½ pulgada de diámetro que forman 90°**

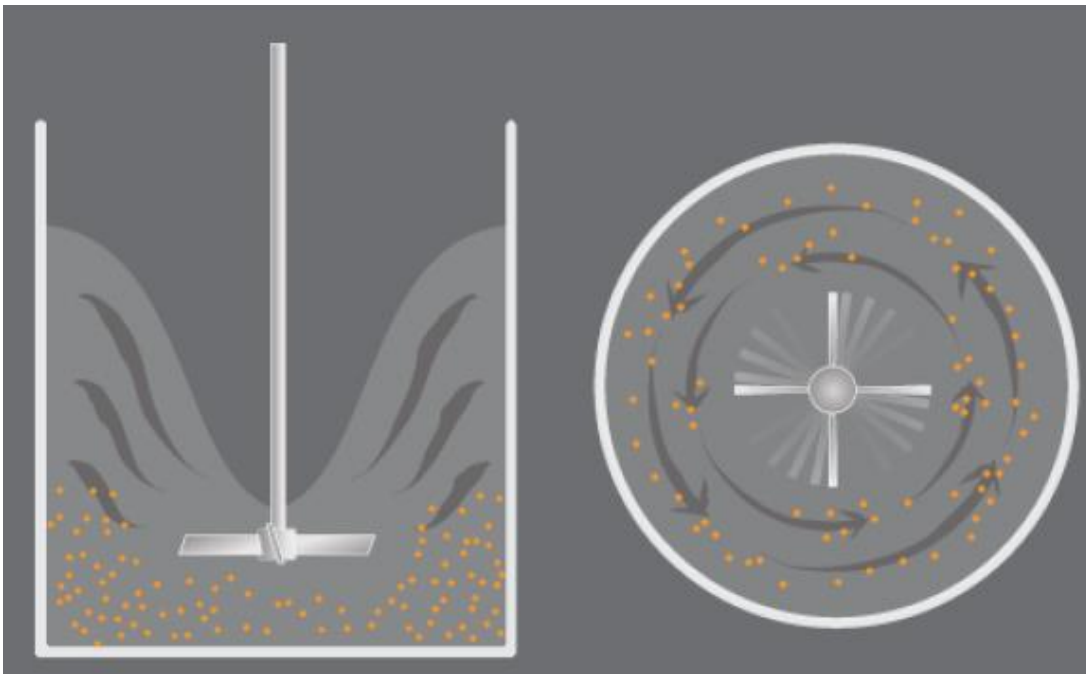


Fuente: elaboración propia.

2.4. Deflectores

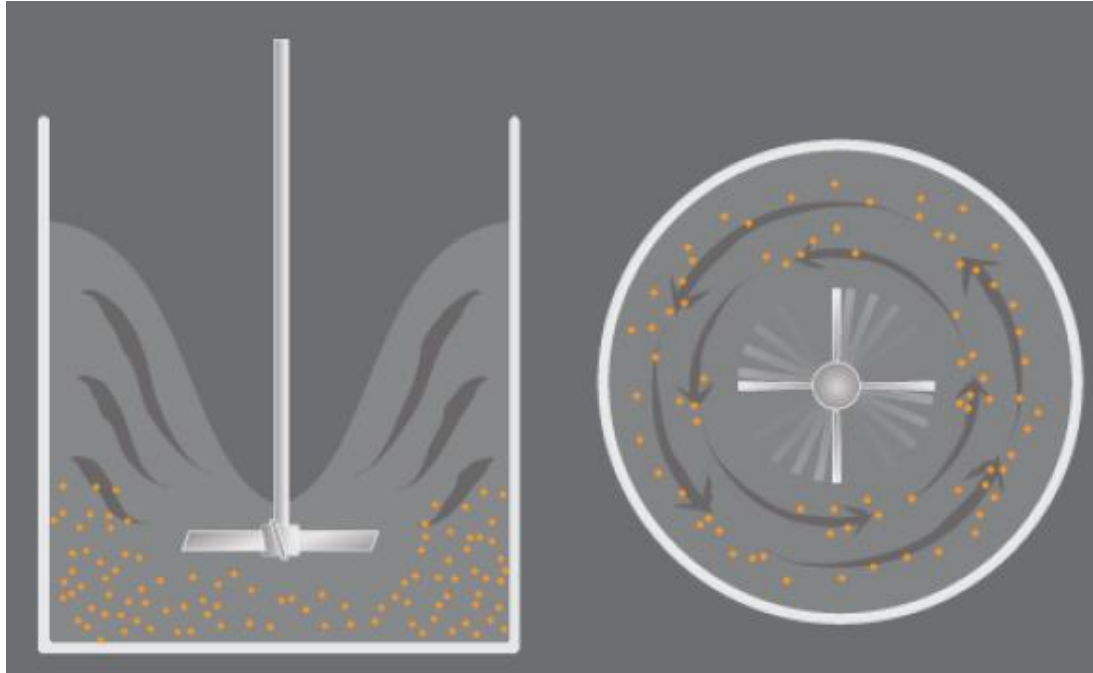
Son de suma importancia cuando se trata de mezclar líquidos en un tanque cilíndrico o esférico, ya que carecen de esquinas donde el líquido puede re direccionar y homogenizar bien las mezclas de los líquidos. Si se tratara de un tanque rectangular, posee esquinas donde el líquido rebota y crea un torbellino interno, lo cual mejora su mezcla. Los deflectores se diseñan de acuerdo con el diámetro y altura del tanque. Son unas extensiones o protuberancias sobrepuestas en la parte interna del tanque; con ello, crean topes para líquidos y torbellinos en los cuadrantes donde se encuentran los deflectores.

Figura 9. **Tanque sin deflectores**



Fuente: Dynamix Agitators, página 2.

Figura 10. **Tanque con deflectores**



Fuente: Dynamix Agitators, página 3.

2.5. **Faja**

Las fajas son comúnmente utilizadas para transferir energía de un motor con polea hacia otra polea, para hacer girar con fuerza motriz las partes interconectadas. Se necesita una faja para girar el agitador con sus aspas y crear un movimiento circulatorio dentro del tanque. Existen tres tipos de fajas: de forma trapezoidal o en "V", estriada y dentada. El tipo de faja depende el tipo de polea que se utilizará tanto en la bomba como en el eje del agitador. Es de suma importancia que las dos poleas sean iguales para comprar la faja.

2.6. Medidor de flujo

También conocido como cuenta galones, es crucial en un proceso donde ingresen líquidos o gases. Permite calcular exactamente cuántos galones entran, para no sobrepasar la capacidad del tanque y añadir correctamente los aditivos al petróleo crudo. Se utilizará al momento de trasegar el producto final a la línea de almacenaje, ya que se debe saber si han ocurrido pérdidas de fluido en el proceso. El cuenta galones se puede graduar, dependiendo de la velocidad requerida para trasegar un líquido. Mientras menos caudal posea, mayor facilidad de leer.

Figura 11. Cuenta galones



Fuente: elaboración propia.

2.7. Motor

Es un equipo alimentado por electricidad o una fuente de combustión interna, que suministra la fuerza motriz para un vehículo o algún otro dispositivo con partes móviles. Va conectado a una polea, una faja hace el movimiento circulatorio entre la polea del motor y la de los agitadores. En este caso se requiere un motor eléctrico tipo “a prueba de explosión”, dada la presencia de componentes volátiles del petróleo.

Figura 12. Motor Siemens



Fuente: elaboración propia.

2.8. Polea

Es una rueda con un plano redondo o borde acanalado que gira sobre un eje de donde se origina la fuerza motriz. Lleva una faja trapezoidal, estriada, dentada, cuerda o una cadena para transmitir el movimiento hacia la siguiente polea, donde se emplea el movimiento. Dependiendo del sistema donde se implementará, tiene un seguro llamado cuñero para fijar el eje dentro de la polea. Otras poseen tuercas con rodamientos internos para atornillar con el eje y lograr su movimiento giratorio.

Figura 13. **Polea estriada con cuñero**



Fuente: elaboración propia.

2.9. Sensor de sulfuro de hidrógeno

Es un dispositivo que detecta o mide una propiedad física y registros, e indica, o de otra manera responde a ella. En este proceso se utilizará un sensor

que mide el nivel de ppm del H₂S. Dependiendo del sensor pueden detectar de 0 ppm hasta 500 ppm, o incluso llegar hasta 2 000 ppm. Con ello se sabrá, con el tiempo estimado de las 48 horas, cuánto baja el nivel hasta llegar a ser tolerable para los equipos y poder ser refinado.

Figura 14. **Sensor de H₂S SensorCon**



Fuente: elaboración propia.

2.10. Tanque cilíndrico

Dentro de las refinerías existen diversos tipos de tanques. Hay esféricos completamente, para evitar acumulación de presiones en las esquinas (en el caso de manejo de gas). Hay tanques cilíndricos de una altura doble al radio o

viceversa. También están los cónicos; el cono se encuentra en la parte inferior del tanque. Estos son adecuados para sistemas donde se debe separar lo liviano delo pesado y drenar. También están los grosores de las láminas para crear los tanques, que pueden variar entre 1/16, 1/8 y ¼, de pulgada de grosor. El tanque debe ser cilíndrico con buena base de anclaje. Dado que estará en constante agitación y circulación se debe evitar la resonancia, que oscile el tanque y, en consecuencia, se desplome para un lado.

2.11. T

Las T son accesorios como los codos de 90° y 45° que facilitan la dirección de fluidos. Sirven para re direccionar el flujo. Una vez la mezcla alcance el nivel requerido de ppm de H₂S, se abrirá una válvula que sale de la T para finalmente llenar los tanques de almacenamiento de producto. Varían de diámetro, dependiendo del tubo que se utiliza para las conexiones y las bridas necesarias. Pueden ser desde ½ pulgada hasta 14 pulgadas de diámetro. Dentro de esas medidas existe T de paso directo, salida lateral y salida bilateral.

Figura 15. **T inoxidable ½ pulgada**



Fuente: elaboración propia.

2.12. Tubos

Son conductos que se utilizan para transportar líquidos y gases. Generalmente están contruidos de acero, pero dependiendo de sus aplicaciones, pueden ser de acero inoxidable. Existen en diferentes medidas, formas y acoples. Dependiendo del tipo que material se va a transportar, se hace referencia al grosor. Se le pregunta al cliente qué tipo de cédula quiere para el tubo; al decir esto, se hace referencia a la medida del grosor o espesor del tubo que forma parte de una tubería. Las cédulas más utilizadas en tubos industriales son cédula 40 (transportar agua) y cédula 80 (transportar a altas presiones). Pueden ser desde ½ pulgada hasta 14 pulgadas de diámetro. De preferencia, los tubos no deben tener costura.

Figura 16. **Varios tubos**



Fuente: elaboración propia.

2.13. Unión universal

Las uniones universales son accesorios como los codos y las T. Su versatilidad reside en que son dos extremos con rosas inversas que ayudan a agregar nuevas uniones de tubos, codos, entre otros agregados para un

sistema. Su singular forma y movimiento permite unir tramos en los que se hayan realizado cortes de segmento de tubería. Por el uso de coplas, enroscar una tubería de ambos lados es imposible. Aparte de dar giro contrario a los dos segmentos de tubería situados a sus extremos, tienen una extensión que permite el alcance hacia los puntos de unión lateral.

Figura 17. **Unión universal desarmada**



Fuente: elaboración propia.

Figura 18. **Unión universal armada al 50 %**



Fuente: elaboración propia

Figura 19. **Unión universal armada en su totalidad**

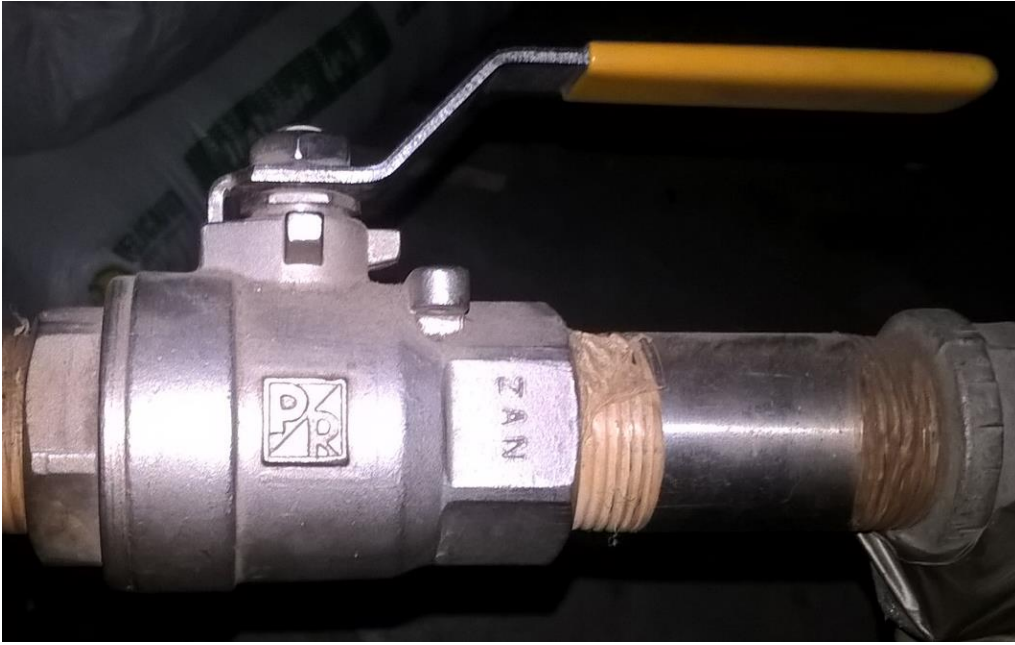


Fuente: elaboración propia.

2.14. Válvula de salida

Una válvula es un accesorio que permite el flujo de un líquido o gas de una sección a otra. Existen diversos tipos de válvulas: de globo, de mariposa, de cheque, de bola, expansión térmica, reductoras de presión, entre otras. Cada una está diseñada para el proceso en el cual se implementará, empezando por el material y el tipo; si es para evitar pérdidas de presión, caudal y tiempo.

Figura 20. **Válvula de bola**



Fuente: elaboración propia.

3. CÁLCULOS PARA EL TANQUE

El reactor de desulfurización de H_2S del crudo de 36 API depende de una muy eficiente agitación para que la reacción se lleve a cabo en un tiempo razonable. Se entiende que el agua y el petróleo no se mezclan entre sí, o sea, forman capas inmiscibles. Esta reacción involucra gas (H_2S , P.E. $-60\text{ }^\circ\text{C}$) disuelto en el petróleo, con otro gas (formaldehído, H_2CO , P.E. $-19\text{ }^\circ\text{C}$) que está disuelto en agua. En esencia, se está forzando el contacto de dos sustancias gaseosas por medio de dos líquidos que no se mezclan entre sí. Las condiciones propicias para que el proceso funcione son de alta turbulencia (flujo turbulento).

El mismo proceso no podría llevarse a cabo bajo flujo laminar, pues habría contacto deficiente entre el petróleo y el agua con formalina, y se demoraría muchísimo. Se trata de ir arriba de los números Reynolds 4 000, flujo turbulento. Otros autores definen este número arriba de 10 000 para excluir toda posibilidad de flujo laminar (Pietranski, PDH Online). Entonces, la mejor manera de lograr buena agitación es combinarla acción de un agitador que gira a alta velocidad, auxiliado con deflectores, con la circulación interna de los líquidos por medio de una bomba centrífuga. Esto crea o multiplica el área de contacto. En particular, se mantiene el nivel de contacto a todo lo largo del reactor con una caída constante de líquido.

Es también muy importante el papel que juega el agitador de la bomba centrífuga, pues contribuye enormemente al contacto entre los materiales involucrados al ejercer una alta velocidad de corte que fuerza un contacto

íntimo entre los dos líquidos. El formaldehído en agua (conocido como “formalina”) es más pesado que el petróleo de API 36 por la siguiente razón:

$$\text{Gravedad API} = \frac{141,5}{\text{Gravedad Específica}} - 131,5 \quad \text{a } 60^{\circ}\text{F}$$

(ecuación 1)

Donde:

- Gravedad API para el petróleo API 36 por tratar es de 0,8468 (dato proporcionado por el Ministerio de Energía y Minas)
- Gravedad específica es dato por encontrar de la formalina

$$\text{Gravedad API} = \frac{141,5}{\text{Gravedad específica}} - 131,5$$

$$0,8468 = \frac{141,5}{\text{Gravedad específica}} - 131,5$$

$$0,8468 + 131,5 = \frac{141,5}{\text{Gravedad específica}}$$

$$\text{Gravedad específica} = \frac{141,5}{0,8468 + 131,5}$$

$$\text{Gravedad específica} = \frac{141,5}{132,34}$$

$$\text{Gravedad específica} = 1,069$$

Tabla I. **Densidad de crudo 36 grados API y la formalina**

SUBSTANCIA	DENSIDAD, Kg/Lt
Petróleo API 36	0,84
Formalina	1,069

Fuente: elaboración propia, programa Excel

El reactor consta de un agitador vertical y los deflectores internos que aumentan la turbulencia. La mayor contraindicación del uso de deflectores es que prácticamente duplican la demanda de potencia del motor (Ref. Perry 4ª. Ed., 21-15). Luego, en la salida de descarga inferior está colocada una bomba centrífuga con retorno hacia la parte superior del tanque, donde se crea una circulación interna constante. Esta mantiene fresco y renovado el contacto entre el petróleo y la formalina. Sin la bomba, el agitador tendría muchos más problemas de contacto, pues aún con los deflectores, no se lograría mantener el agua con formaldehído en contacto íntimo en la carcasa de la bomba, ni con la parte superior del reactor.

Si se empleara únicamente el agitador, se haría girar los dos líquidos con bastante turbulencia, pero habría tendencia a que se sedimente la formalina, y el contacto entre ambos sería menos deseable. Además, se necesitaría elevar las revoluciones del agitador a un punto que requeriría un motor de mayor potencia, ya que se tendría que cambiar la relación de las poleas o del motorreductor. Por otro lado, si se empleara únicamente la bomba centrífuga para mantener la mezcla de líquidos en circulación constante, se perdería la agitación en el cuerpo principal del reactor, y el proceso sería menos eficiente.

3.1. Presión

La reacción de desulfurización se lleva a cabo a temperatura y presión atmosféricas, por lo que no es necesario un tanque presurizado. Sin embargo, el peligro que presenta el H₂S requiere que el tanque sea no solo hermético, sino que además aguante un mínimo de presión para evitar cualquier posibilidad de fuga.

Dado que la reacción es un proceso que ocurre a presión ambiente, se considera que un valor prudente de presión interna sea únicamente el correspondiente a la presión hidrostática. Tomando en cuenta que el diámetro máximo deseado para el reactor es de 4m, siguiendo la siguiente relación dentro de la ecuación se podrá llegar a una altura máxima permitida con dicho diámetro.

$$h = d(1,5) \text{ metros}$$

(ecuación2)

Donde:

- h es la altura (metros)
- d es el diámetro (metros)
-

$$h = 3\text{metros}(1,5)$$

$$h = 4,5 \text{ metros}$$

En la parte interior de un tanque completamente lleno de petróleo de 36 grados API, densidad de 0,8468 Kg/Lt, se debe estimar la presión hidrostática. Para calcularla se toma en cuenta la relación de presión, densidad y altura.

$$p = \rho gh \text{ pascales}$$

(ecuación3)

Donde:

- p es la presión (pascales)
- ρ es la densidad (kilogramos sobre metro cúbico)
- g es la constante de la gravedad (por trabajar en SI se usará $9,81\text{m/s}^2$)

- h es la altura (metros)

$$\rho = \left(0,8468 \frac{\text{Kg}}{\text{Lt}}\right) \left(\frac{1\text{Lt}}{0,001\text{m}^3}\right)$$

$$\rho = 846,8 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3}$$

$$p = \rho gh$$

$$p = \left(846,8 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right) \left(9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}\right) (6\text{m})$$

$$p = 49\,842,65 \frac{\text{kg}}{\text{ms}^2}$$

$$p = 49\,842,65 \text{ pascales}$$

$$p = (49\,842,65 \text{ pascales}) \left(\frac{0,00014504 \text{ psi}}{1 \text{ pascal}}\right)$$

$$p = 7,23 \text{ psi}$$

Este valor, por la presión baja que se obtuvo, se puede redondear a condiciones atmosféricas normales para tener un factor de seguridad en la agitación, bombeo y cambios de temperatura que pueden afectar y cambiar drásticamente la presión interna. Se deja la presión de 14,7 psi, que es igual a 1 atmósfera.

3.2. Grosor de la lámina inoxidable

El cálculo del grosor de la lámina metálica (acero inoxidable) se lleva a cabo con una relación empírica simplificada (excluye aspectos de soldadura y tensión en material) empleada por ASME. Se puede realizar dado que se obtuvo la presión máxima con la que se trabajará durante el proceso (14,7 psi). Dicha ecuación se expresa de la siguiente manera:

$$p\left(\frac{d}{2}\right) = 15\,000t \text{ pulgadas}$$

(ecuación4)

Donde:

- p es la presión interna en (psi)
- d es el diámetro del reactor (pulgadas)
- t es el grosor de la pared del reactor (pulgadas)

$$d = (3\text{m})\left(\frac{39,37 \text{ pulgadas}}{1\text{m}}\right)$$

$$d = 118,11 \text{ pulgadas}$$

$$p\left(\frac{d}{2}\right) = 15\,000t$$

$$14,7 \text{ psi}\left(\frac{118,11 \text{ pulgadas}}{2}\right) = 15\,000t$$

$$868,11\text{pulgadas} = 15\,000t$$

$$\frac{868,11\text{pulgadas}}{15\,000} = t$$

$$t = 0,0578739 \text{ pulgadas}$$

$$t = 1,47 \text{ mm}$$

Debido a la fabricación mundial de láminas y sus medidas estándar, para dicho tanque se utilizará una lámina de $\frac{1}{16}$ pulgadas de grosor de acero inoxidable 304. En milímetros, la medida es de 1,5875 mm. Dicho dato es corroborado por la *ASME Boiler and Pressure Vessel Code (BPVC)* sección VIII división 1 y división 2.

3.3. Normas API

Los estándares del American Petroleum Institute (API) abogan por prácticas de ingeniería y operación comprobada y sólida, y equipos y materiales seguros e intercambiables, desde brocas hasta protección ambiental. Se incluyen manuales, normas, especificaciones, prácticas recomendadas, boletines, pautas e informes técnicos. Los estándares permiten mejora la excelencia operativa, garantizar el cumplimiento y las prácticas seguras y mitigar riesgos en fallas de equipos

3.3.1. API 620

- Diseño y construcción de tanques de almacenamiento de baja presión soldados con autógena.
- Tanques de almacenamiento de gran tamaño.
- Temperaturas desde -32°F hasta 250°F (-35°C hasta 121°C).
- Presiones internas hasta 15 psig.

3.3.2. API 650

- Especificación general para diseñar un tanque de almacenamiento de acero soldado con autógena para el almacenaje de petróleos.
- Tanques de almacenamiento de gran tamaño.
- Temperaturas desde -40°F hasta 500°F (-40°C hasta 260°C).
- Presiones internas hasta 2,5 psig.

3.4. Configuración de deflectores

Los deflectores son placas largas y planas que se unen al costado del tanque para evitar el remolino y promover el movimiento de los fluidos de arriba hacia abajo. Se utilizan más comúnmente para la mezcla y las suspensiones sólidas porque estas aplicaciones utilizan a menudo los tanques verticales, cilíndricos, que tienden a crear patrones que remolinan, sin importar el tipo de agitador que es utilizado.

Los deflectores se calculan con base en los siguientes cinco pasos:

- El número de deflectores puede ser de 3 a 4 (4 es ideal, pero 3 resultará en suficiente mezcla). La adición de más de cuatro deflectores no dará lugar a ninguna mejora de mezcla significativa.
- El ancho de cada deflector se calcula con referencia al diámetro del tanque donde se instalarán.

$$W = \frac{D}{12} \text{ pulgadas}$$

(ecuación 5)

$$W = \frac{118,11}{12} \text{ pulgadas}$$

$$W = 9,84 \text{ pulgadas}$$

Al ver el resultado se aproximará el ancho del deflector.

$$W = 10 \text{ pulgadas}$$

- El grosor de cada deflector, por regla general, debe ser $\frac{1}{8}$ pulgada para tanques menores de 1 000 galones y $\frac{1}{4}$ pulgada para tanques mayores de 1 000 galones
- El largo de cada deflector comienza aproximadamente a 6 pulgadas de la parte inferior y termina justo por encima del nivel máximo de líquido (H).
- La posición de montaje de los deflectores se calcula con referencia al diámetro del tanque donde se instalarán.

$$MP = \frac{D}{72} \text{ pulgadas}$$

(ecuación 6)

$$MP = \frac{118,11}{72} \text{ pulgadas}$$

$$MP = 1,64 \text{ pulgadas}$$

Al ver el resultado se aproximará la distancia de la pared del deflector con el tanque.

$$MP = 2 \text{ pulgadas}$$

3.5. Configuración de agitadores

La configuración de los agitadores es similar a como se hizo con los deflectores; es decir, utiliza la altura máxima de líquido dentro del tanque y su diámetro total. La altura total del tanque es de 4,5m pero por seguridad se dejará 0,5m (aproximadamente 10 % factor de seguridad) de espacio libre; por

ende, el nivel máximo de líquido será de 4m. El número de caras de los agitadores (aspas) puede ser de 3 a 4 (4 es ideal, pero 3 resultará en suficiente mezcla). Cada aspa con un ángulo de inclinación de 45° para dar un golpe al líquido sin causar mayor resistencia al agitador, mucho menos al motor. Se debe tomar en cuenta cinco ecuaciones para su respectivo cálculo. Son las siguientes:

- El largo del eje del agitador será de 4,5m, que es el alto total del tanque con un diámetro de 1 pulgada. El agitador se debe poner al final del eje, pero la posición de este con respecto al fondo del tanque se calcula con referencia al nivel máximo de líquido dentro del tanque. En este caso, el tanque tendrá 0,5 m de espacio de aire; por ende, la altura total de líquido será de 4m. La ecuación para encontrar la posición con relación al fondo es:

$$z = \frac{H}{6}$$

(ecuación 7)

$$z = \frac{4m}{6}$$

$$z = 0,666m$$

Es decir que, del fondo del tanque, el agitador se encuentra a 0,666m hacia arriba.

- Para encontrar la posición del segundo agitador en el eje es necesario medir del fondo del eje hacia arriba con la siguiente ecuación, para una posición exacta.

$$y = \frac{H}{2}$$

(ecuación 8)

$$y = \frac{4}{2}$$

$$y = 2\text{m}$$

Significa que el segundo agitador queda 2m del fondo del eje hacia arriba.

- Para encontrar el diámetro del agitador se debe usar una relación de diámetro del tanque.

$$\frac{d}{D} = 0,6 - 0,3$$

(ecuación 9)

$$\frac{d}{3\text{m}} = 0,3$$

$$d = (3)(0,3)$$

$$d = 0,9\text{m}$$

- El ancho del agitador es muy importante y también va en relación con el diámetro, pero de su mismo agitador.

$$w = \frac{d}{8}$$

(ecuación 10)

$$w = \frac{0,9\text{m}}{8}$$

$$w = 0,1125\text{m}$$

3.6. Potencia de motor

La determinación exacta de la potencia requerida para un sistema agitador es un proceso relativamente complejo, sujeto a distintas variables. Se recomienda que la velocidad no exceda las 100 rpm debido a la volatilidad y viscosidad, así que dichas revoluciones serán su velocidad final.

Estas incluyen:

- Geometría del reactor
- Viscosidad del líquido agitado
- Densidad del líquido Agitado
- Presencia o ausencia de deflectores, y su número
- Diseño del agitador, su diámetro, posición y número de los mismos.

Las siguientes ecuaciones están planteadas para ser utilizadas con dimensionales del Sistema Internacional.

- Encontrar el número de Reynolds

$$N_{Re} = (d^2)(N) \left(\frac{\rho}{\mu} \right)$$

(ecuación 11)

Donde:

- d es el diámetro del agitador (pies)
- N es el número de revoluciones deseadas para el agitador (rph)
- ρ es la densidad del líquido $\left(\frac{\text{lb}}{\text{pie}^3} \right)$

- ϑ es la viscosidad del líquido $\left(\frac{\text{lb}}{\text{h}\cdot\text{pie}}\right)$

Densidad en SI

$$\rho = \frac{0,8468 \text{ Kg}}{\text{Lt}} \times \frac{1\text{Lb}}{0,454\text{Kg}} \times \frac{28,314\text{Lt}}{1\text{pie}^3}$$

$$\rho = 52,81 \frac{\text{Lb}}{\text{pie}^3}$$

Viscosidad en SI

$$\vartheta = 4,3\text{cp} \times \frac{2,4 \frac{\text{Lb}}{\text{pie}\cdot\text{h}}}{1\text{cp}}$$

$$\vartheta = 10,406 \frac{\text{Lb}}{\text{pie}\cdot\text{h}}$$

N en RPH

$$N = 100\text{rpm} \times \frac{60\text{H}}{1\text{M}}$$

$$N = 6\,000\text{rph}$$

Diámetro de agitador

$$d = 0,9\text{m} \times \frac{3,28\text{pies}}{1\text{m}}$$

$$d = 2,952 \text{ pies}$$

Con la ecuación 10 y sustituyendo los datos anteriormente encontrados, se tiene:

$$N_{\text{Re}} = (d^2)(N) \left(\frac{\rho}{\vartheta}\right)$$

$$N_{\text{Re}} = (2,952 \text{ pies})^2 (6\,000\text{rph}) \left(\frac{52,81\text{H}}{10,406 \text{ pies}}\right)$$

$N_{\text{Re}} = 265,348$ Flujo turbulento

- Calcular el número de potencia

Para determinar el número de potencia es necesario utilizar dos tablas y un juego de ecuaciones. Se debe saber las medidas del tanque, como el diámetro, el alto total de líquido, las dimensiones del agitador y los deflectores.

Los pasos para calcular el número de potencia son los siguientes:

- Utilizar el juego de ecuaciones (ecuación 12).
- Basarse en la Tabla II para descifrar el factor de S y sus respectivas relaciones.
- Una vez obtenido los datos de la ecuación 12, comparar datos con la Tabla III y así definir el número de potencia.

$$S1 = \frac{D}{d}$$

$$S2 = \frac{Z}{d}$$

$$S3 = \frac{r}{d}$$

$$S4 = \frac{d}{w}$$

$$S5 = \frac{D}{W}$$

$$S6 = \frac{H}{d}$$

$$S7 = \# \text{ hélices}$$

$$S8 = \text{grados}$$

$$S9 = \# \text{ deflectores}$$

(ecuación 12)

Tabla II. Descripción de factores y su relación

Factor	Relación	Descripción
S1	$\frac{D}{d}$	Diámetro del tanque/diámetro del agitador
S2	$\frac{Z}{d}$	Altura del agitador sobre fondo de tanque/diámetro del agitador
S3	$\frac{r}{d}$	Radio del agitador/diámetro del agitador
S4	$\frac{d}{w}$	Diámetro del agitador/ancho del aspa de agitador
S5	$\frac{D}{W}$	Diámetro del tanque/ancho del deflector
S6	$\frac{H}{d}$	Altura máxima de líquido/diámetro del agitador
S7	#	Número máximo de hélices por agitador
S8	<i>Grados</i>	Grados del aspa de agitador
S9	#	Numero de deflectores

Fuente: elaboración propia, programa Excel

Tabla III. **Número de potencia con relación a deflectores y agitadores**

Tipo agitador	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9	Número de potencia si N_{Re} es turbulento
Propela	3	0,75-1,3	ND	ND	10	2,7-3,9	3	Inclinación=d	4	0,35
Propela	3	0,75-1,3	ND	ND	10	2,7-3,9	3	Inclinación=2d	4	0,9
Hélice inclinada	ND	ND	ND	8	12	ND	6	45°	4	1,5
Hélice recta	ND	ND	ND	8	12	ND	6	0°	4	3
Hélice curva	ND	ND	ND	8	ND	ND	ND	0°	Nd	2,7
Hélice plana	3	0,73-1,3	0,25	5	6	2,7-3,9	6	0°	4	7
Hélice plana	3	0,73-1,3	0,25	5	10	2,7-3,9	6	0°	4	6
Hélice plana	3	0,73-1,3	0,25	5	25	2,7-3,9	6	0°	4	4
Paleta plana	3	0,73-1,3	1	4	10	2,7-3,9	2	0°	4	1,8

Fuente: elaboración propia, programa Excel.

Utilizar ecuación 12

$$S1 = \frac{D}{d} = \frac{3}{0,9} = 3,3$$

$$S2 = \frac{Z}{d} = \frac{0,663}{0,9} = 0,74$$

$$S3 = \frac{r}{d} = \frac{0,45}{0,9} = 0,5$$

$$S4 = \frac{d}{w} = \frac{0,9}{0,1125} = 8$$

$$S5 = \frac{D}{W} = \frac{3}{0,2549} = 11,74$$

$$S6 = \frac{H}{d} = \frac{4,5}{0,9} = 5$$

$$S7 = \# \text{ hélices} = 4$$

$$S8 = \text{grados} = 45$$

$$S9 = \# \text{ deflectore} = 4$$

Tras interpretar los datos que se obtienen de la ecuación 11, se puede comparar con la Tabla IV y el cálculo de número de potencia sería de 1,5.

$$N_p = 1,5$$

- Calcular la potencia de entrega

$$P_E = \frac{(N_p)(\rho)(N)^3(d)^5 \text{ Lb} \cdot \text{pie}}{G \quad s}$$

(ecuación 13)

Donde:

- N_p es el número de potencia
- ρ es la densidad del líquido $\left(\frac{\text{lb}}{\text{pie}^3}\right)$
- N es el número de revoluciones deseadas para el agitador (rps)
- d es el diámetro del agitador (pies)
- G es la gravedad $32,3 \text{ pie} \cdot \text{s}^2$

N en rps

$$N = 100\text{rpm} \times \frac{1\text{M}}{60\text{S}}$$
$$N = 1,666\text{rps}$$

Con base en la ecuación 13 se sustituye los datos encontrados:

$$P_E = \frac{(N_p)(\rho)(N)^3(d)^5}{G}$$
$$P_E = \frac{(1,5) \left(52,81 \frac{\text{Lb}}{\text{pie}^3}\right) (1,66\text{rps})^3 (2,952 \text{ pies})^5}{32,2 \text{ pie} \cdot \text{s}^2}$$
$$P_E = \frac{82\,113,428 \text{ Lb} \cdot \text{rps}^3 \cdot \text{pie}^2}{32,2 \text{ pie} \cdot \text{s}^2}$$
$$P_E = 2\,550,11 \frac{\text{Lb} \cdot \text{pie}}{\text{s}}$$
$$P_E = 2\,550,11 \frac{\text{Lb} \cdot \text{pie}}{\text{s}} \times \frac{1\text{HP}}{550 \frac{\text{Lb} \cdot \text{pie}}{\text{s}}}$$
$$P_E = 4,64\text{HP}$$

- Potencia real, tomando en cuenta un 80% de eficiencia; es decir, un 20 % de pérdida de potencia.

$$P_R = \frac{P_E}{1 - \text{pérdida}}$$

(ecuación 14)

$$P_R = \frac{4,64\text{HP}}{1 - 0,20}$$

$$P_R = 5,79\text{HP}$$

- Una vez encontrada la potencia real requerida para el sistema, se debe ir a la Tabla V y ver el dato de potencia más próximo para elegir el motor correcto en HP.

Tabla IV. **Potencia de motor eléctrico trifásico**

Motor HP	RPM	
	Baldor * Monofásico 60Hz 115V, 230V	Dayton ** Monofásico 60Hz 115V, 230V
1	1 750	1 725, 1 740 y 3 450
1.5	1 750	1 750
2	1 750	1 725 y 3 450
3	1 725	1 735, 1 745 y 3 450
5	1 725	1 740, 1 745 y 3 530
7.5	1 750	1 740 y 3 530
10	1 750	1 740
15	1 750	N/A

Fuente: elaboración propia, programa Excel.

*Datos obtenidos de Baldor catálogo 315

** Datos obtenidos de Granger Catalog Dayton Motors

Con base en la Tabla V y el dato de potencia real de motor, que fue de 5,79HP, se debe aproximar al número mayor siguiente, que en el caso de la tabla y por fabricación, sería un motor de 7,5HP.

$$P_R = 7,5HP$$

3.7. Dimensiones de poleas

Con el dato de la potencia real para el sistema de 7,5HP se puede buscar motores. Los que tienen esa potencia poseen revoluciones de 1 750rpm. Por ende, se debe bajar las revoluciones hasta 100rpm, que es lo requerido para dicho proceso. Para lograrlo se necesita de las siguientes ecuaciones:

$$N1 \times D1 = N2 \times D2$$

(ecuación 15)

$$N2 = N1 \times \left(\frac{D1}{D2}\right)$$

(ecuación 16)

Donde:

- N1 velocidad de giro de la polea conductora, motor (rpm)
- N2 velocidad de giro de la polea conducida, agitador (rpm)
- D1 diámetro de la polea conductora, motor (m)
- D2 diámetro de la polea conducida, agitador (m)

Se sabe que desean utilizar una polea conductora de 20 cm de diámetro, rpm del motor 1 750 y rpm requeridas de 100. Se utilízala ecuación 15.

$$N1 \times D1 = N2 \times D2$$

$$\frac{N1 \times D1}{N2} = D2$$

$$\frac{1\ 750 \times 20}{100} = D2$$

$$D2 = 350\text{cm}$$

El diámetro del reactor es de 3m y la polea conducida calculada es de 3,5m. Esto indica que no es una reducción deseada. Por ende, se debe buscar un motorreductor para reducir una cantidad razonable las revoluciones por minuto, sin necesidad de poleas grandes, y después diseñar poleas de tamaño adecuado.

Se consigue un motorreductor con relación de reducción de 11. Es decir:

$$\frac{1\ 750}{11} = 159,09 \text{ rpm}$$

Con ese motorreductor, la velocidad de salida ahora es de 159 rpm. Con los mismos datos anteriores se calcula el diámetro de la polea conducida.

$$\frac{N1 \times D1}{N2} = D2$$
$$D2 = \frac{159 \times 21}{100}$$
$$D2 = 33 \text{ cm}$$

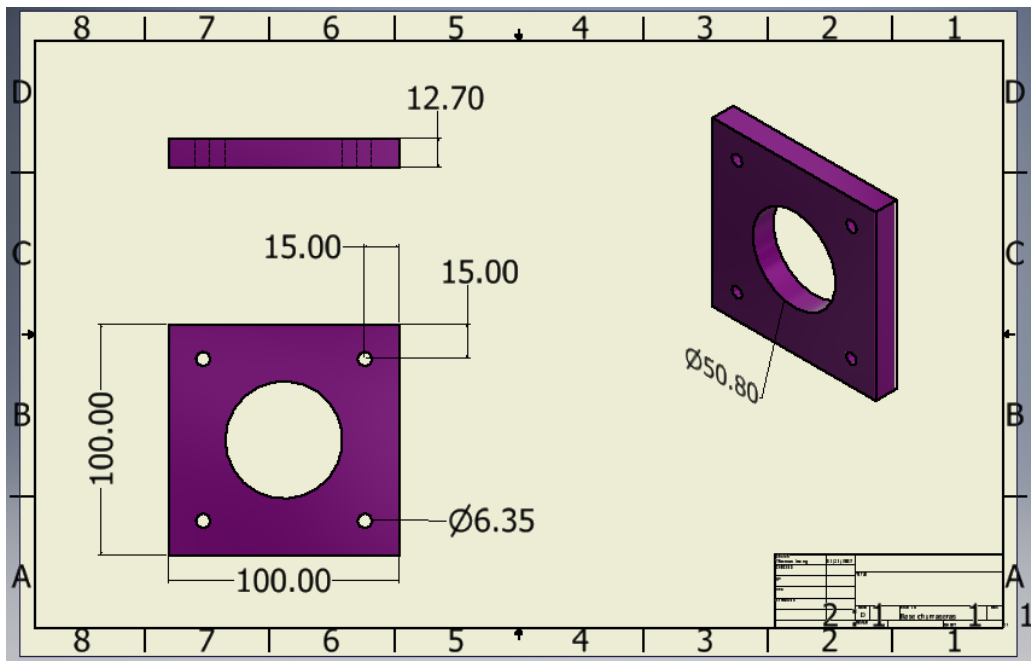
3.8. Bomba

Se desea implementar una bomba con caudal de 100gpm, con una entrada y salida mínima de 3 pulgadas de diámetro de tubería. Se necesita un caudal elevado, dado que el volumen final del tanque es de 7 468 galones. De lo anterior se deduce que en 1 hora 15 minutos habrá circulado el reactor lleno y logrado una mezcla adecuada en conjunto del motor, el agitador y los deflectores. La bomba debe ser centrífuga horizontal autocebable.

3.9. Diseño final

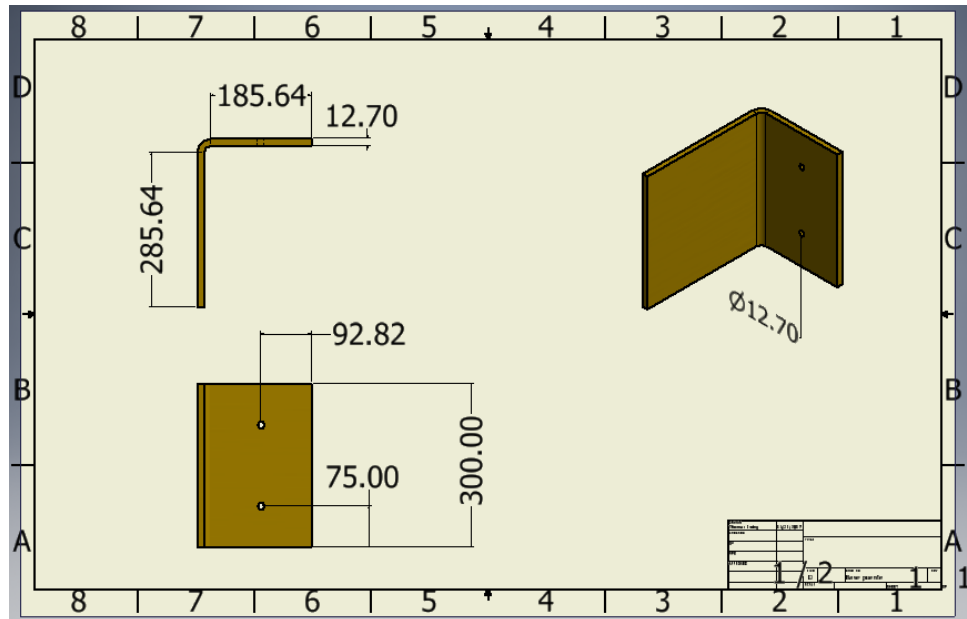
Con los datos encontrados se procede al diseño final del tanque. Se utilizarán tres codos de 45° de 3 pulgadas de diámetro. Serán de 45° para evitar pérdidas por fricción y golpes dentro de la tubería en los quiebres. Así mismo, se utilizarán dos válvulas de globo: una para drenar el reactor, con un codo de 90°, y otra para alimentar la bomba, entre ellas una T. Debe poseer una tubería de alimentación de 4 pulgadas de diámetro, un manhole (ya prediseñados con diámetros acordes para que pueda entrar una persona a la vez al tanque) y un venteo para medir el H₂S con una tubería de ¼ de pulgada y una válvula de bola de ¼ de pulgada.

Figura 21. Base de chumacera



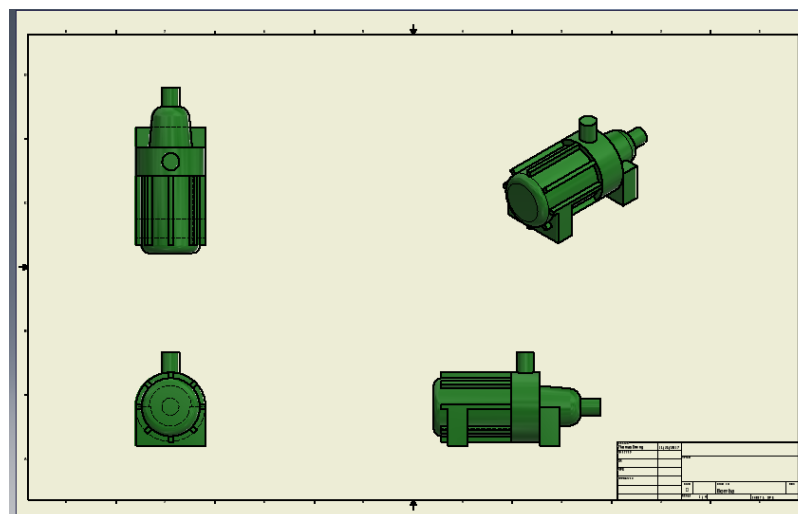
Fuente: elaboración propia, programa Autodesk Inventor 2017.

Figura 22. **Diseño de base de puente**



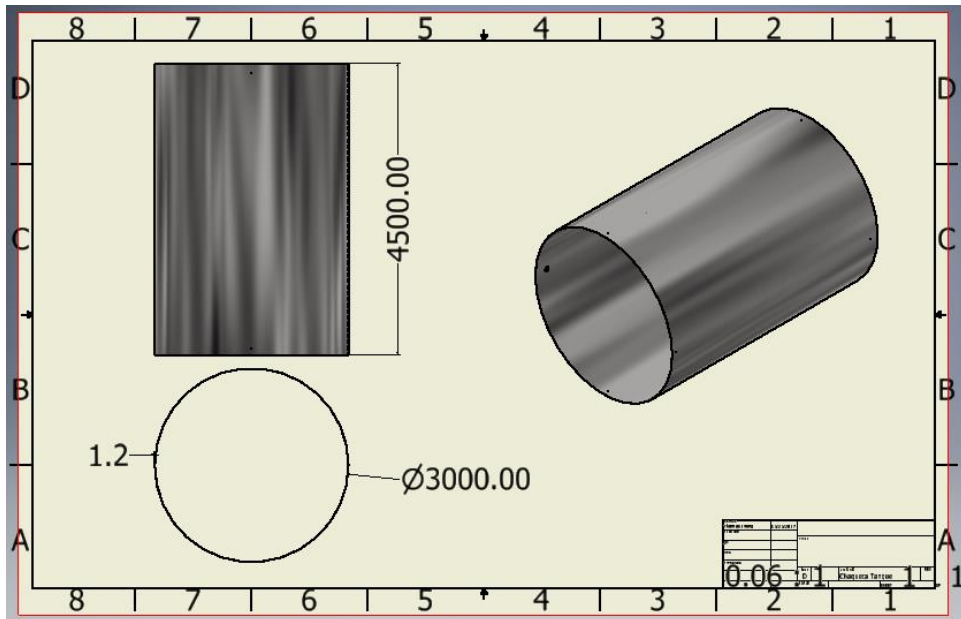
Fuente: elaboración propia, programa Autodesk Inventor 2017

Figura 23. **Bomba centrífuga**



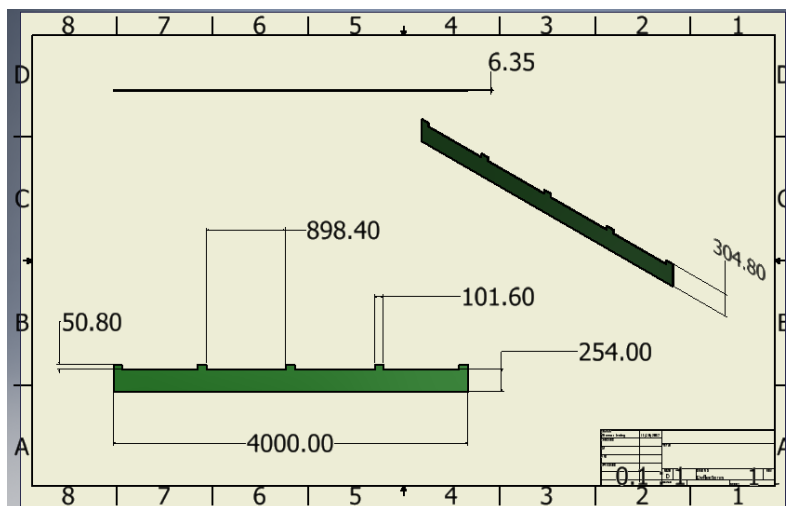
Fuente: elaboración propia, programa Autodesk Inventor 2017.

Figura 24. Chaqueta de tanque



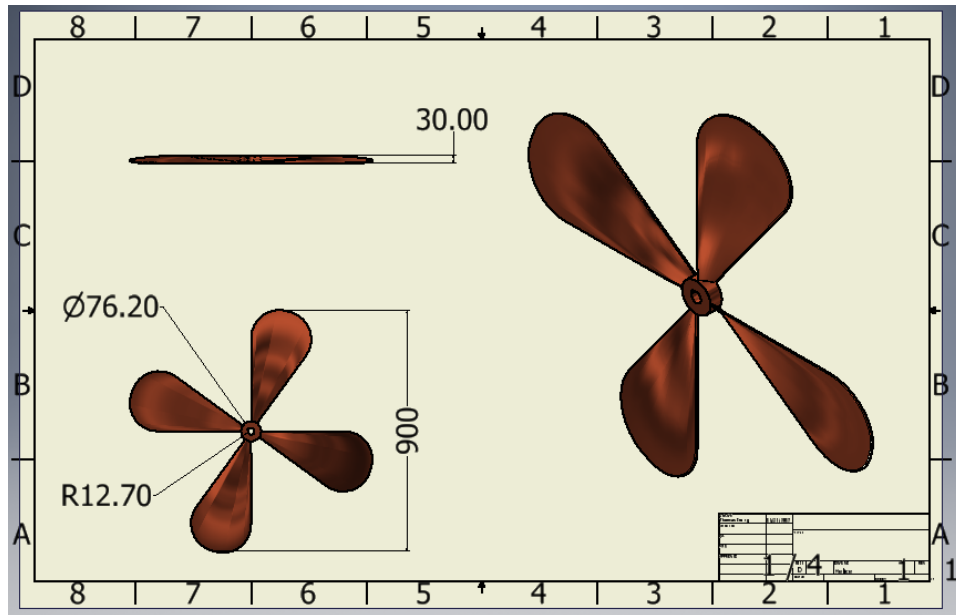
Fuente: elaboración propia, programa Autodesk Inventor 2017.

Figura 25. Deflectores



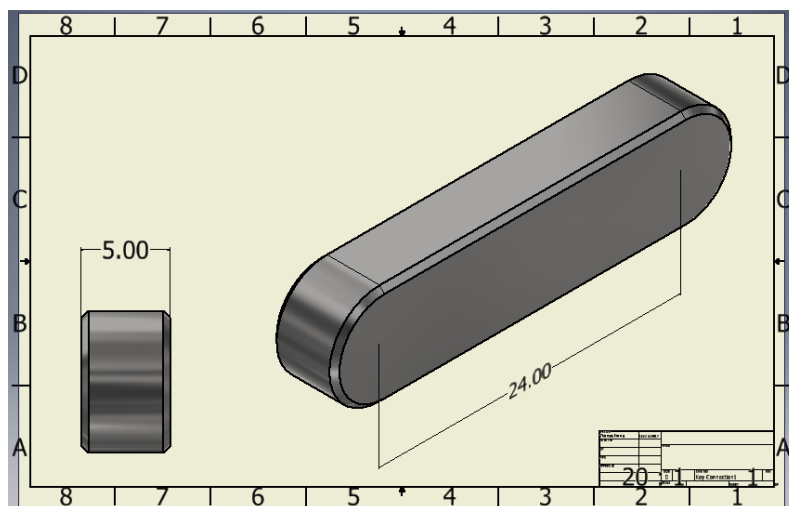
Fuente: elaboración propia, programa Autodesk Inventor 2017.

Figura 26. Hélice para agitador



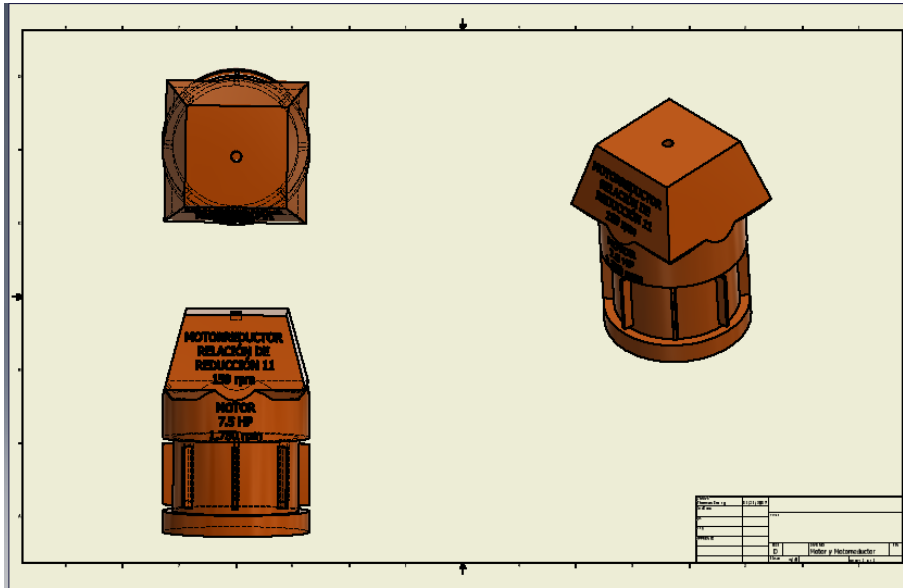
Fuente: elaboración propia, programa Autodesk Inventor 2017

Figura 27. Cuñero



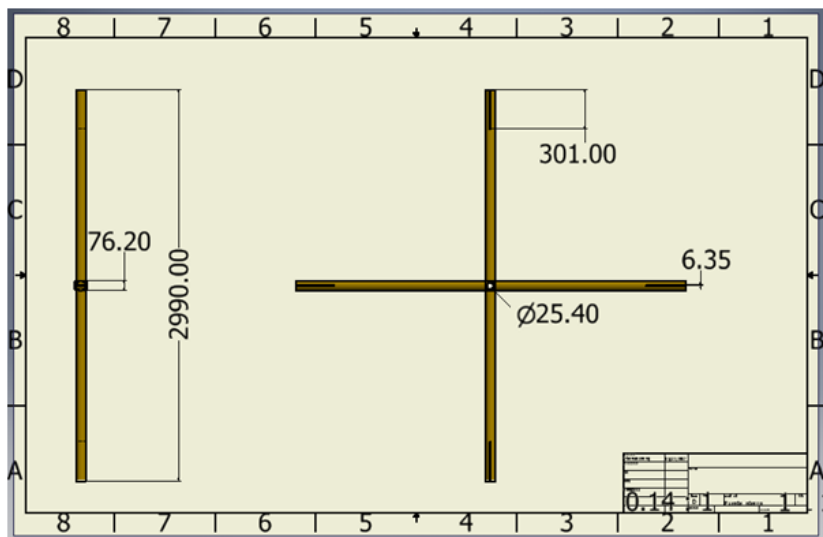
Fuente: elaboración propia, programa Autodesk Inventor 2017

Figura 28. Motor con motorreductor



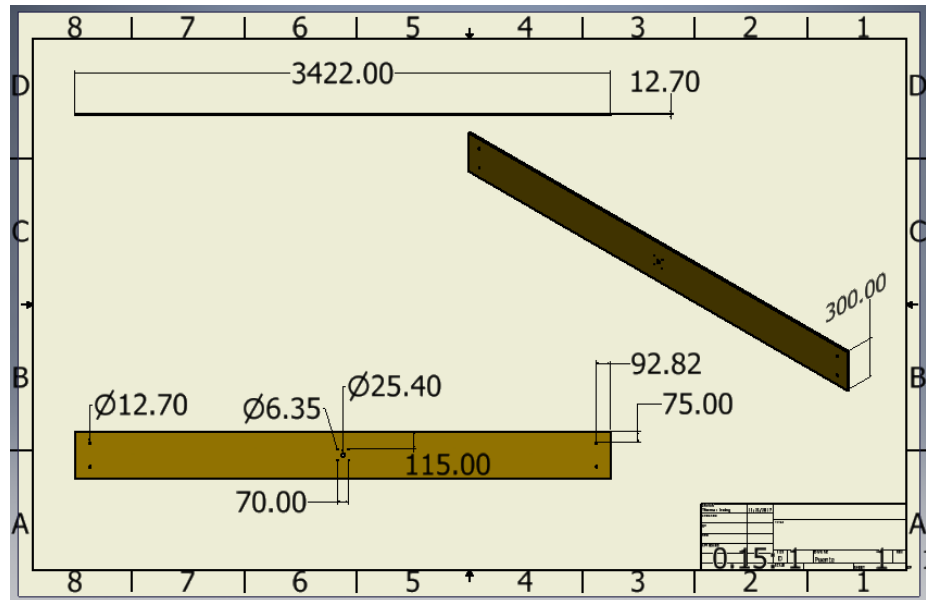
Fuente: elaboración propia, programa Autodesk Inventor 2017.

Figura 29. Puente interno antioscilaciones



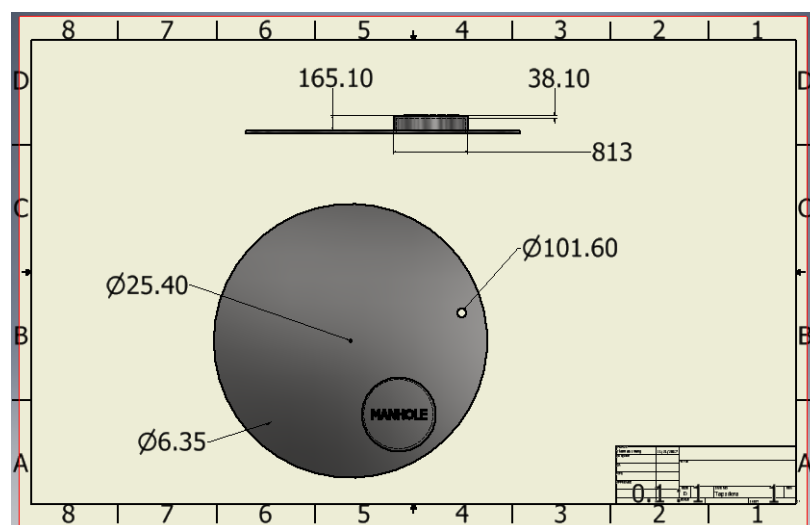
Fuente: elaboración propia, programa Autodesk Inventor 2017

Figura 30. **Puente superior**



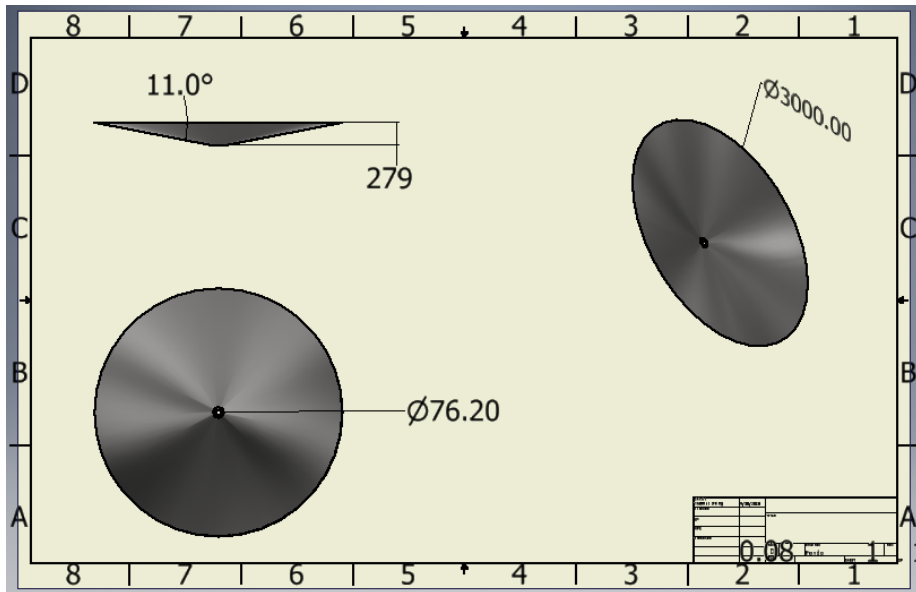
Fuente: elaboración propia, programa Autodesk Inventor 2017

Figura 31. **Tapadera de tanque**



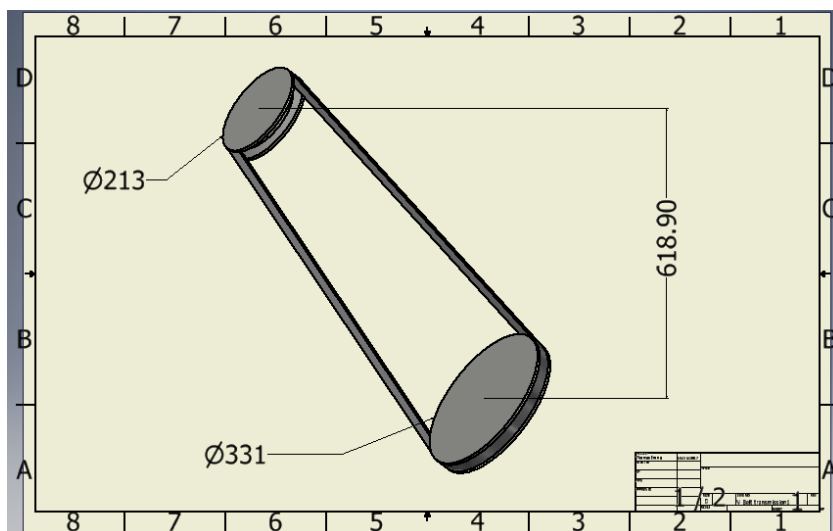
Fuente: elaboración propia, programa Autodesk Inventor 2017

Figura 32. Fondo de tanque



Fuente: elaboración propia, programa Autodesk Inventor 2017.

Figura 33. Sistema de poleas y faja



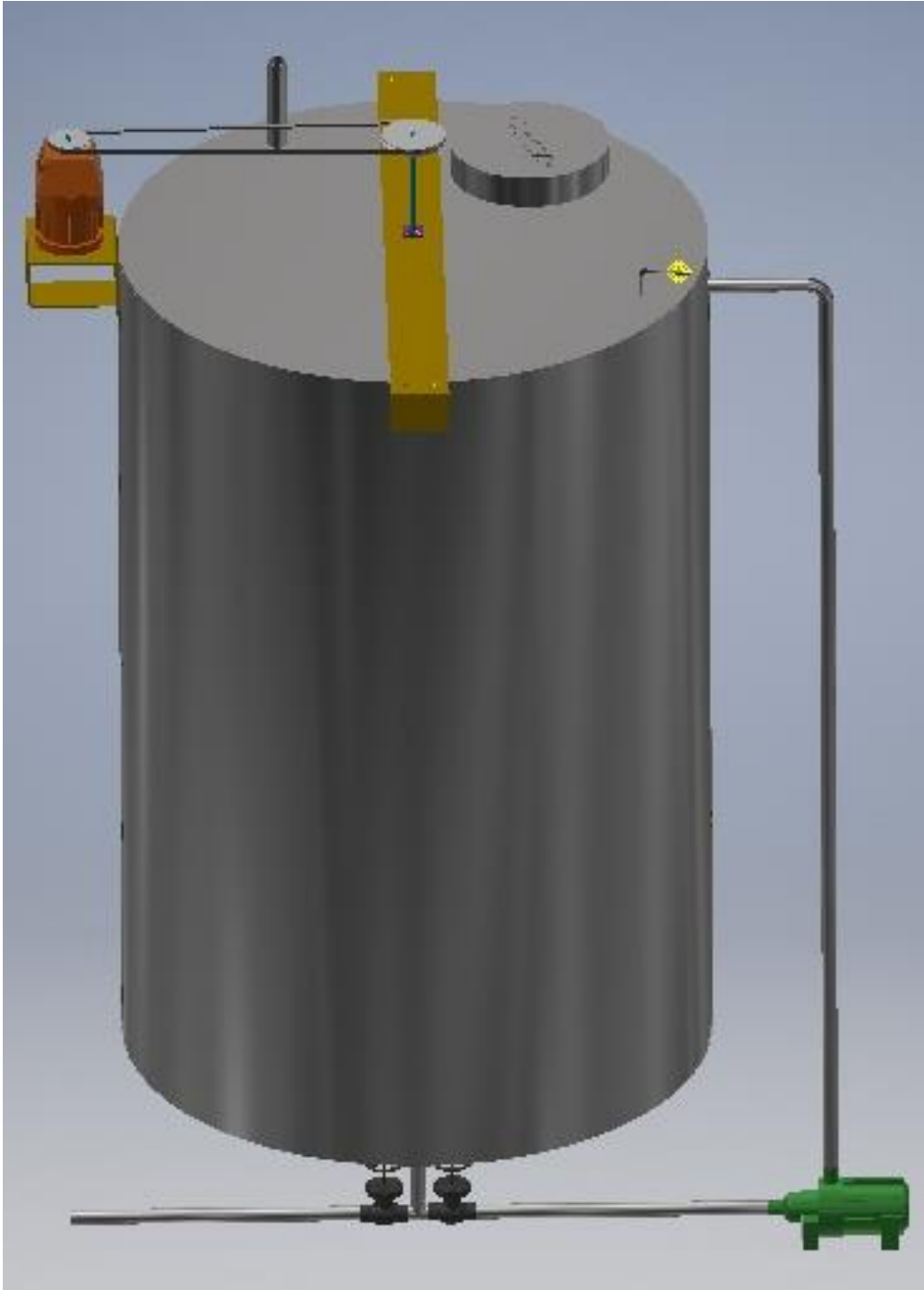
Fuente: elaboración propia, programa Autodesk Inventor 2017

Figura 34. **Tanque prepurificador**



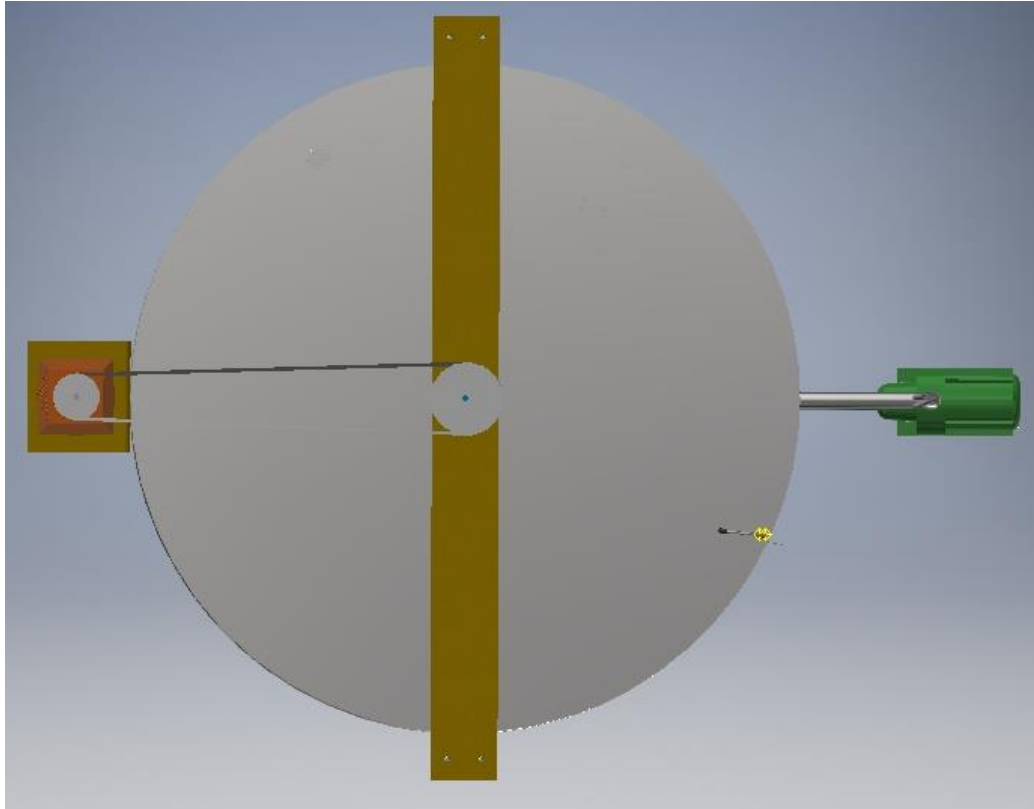
Fuente: elaboración propia, programa Autodesk Inventor 2017.

Figura 35. **Tanque prepurificador**



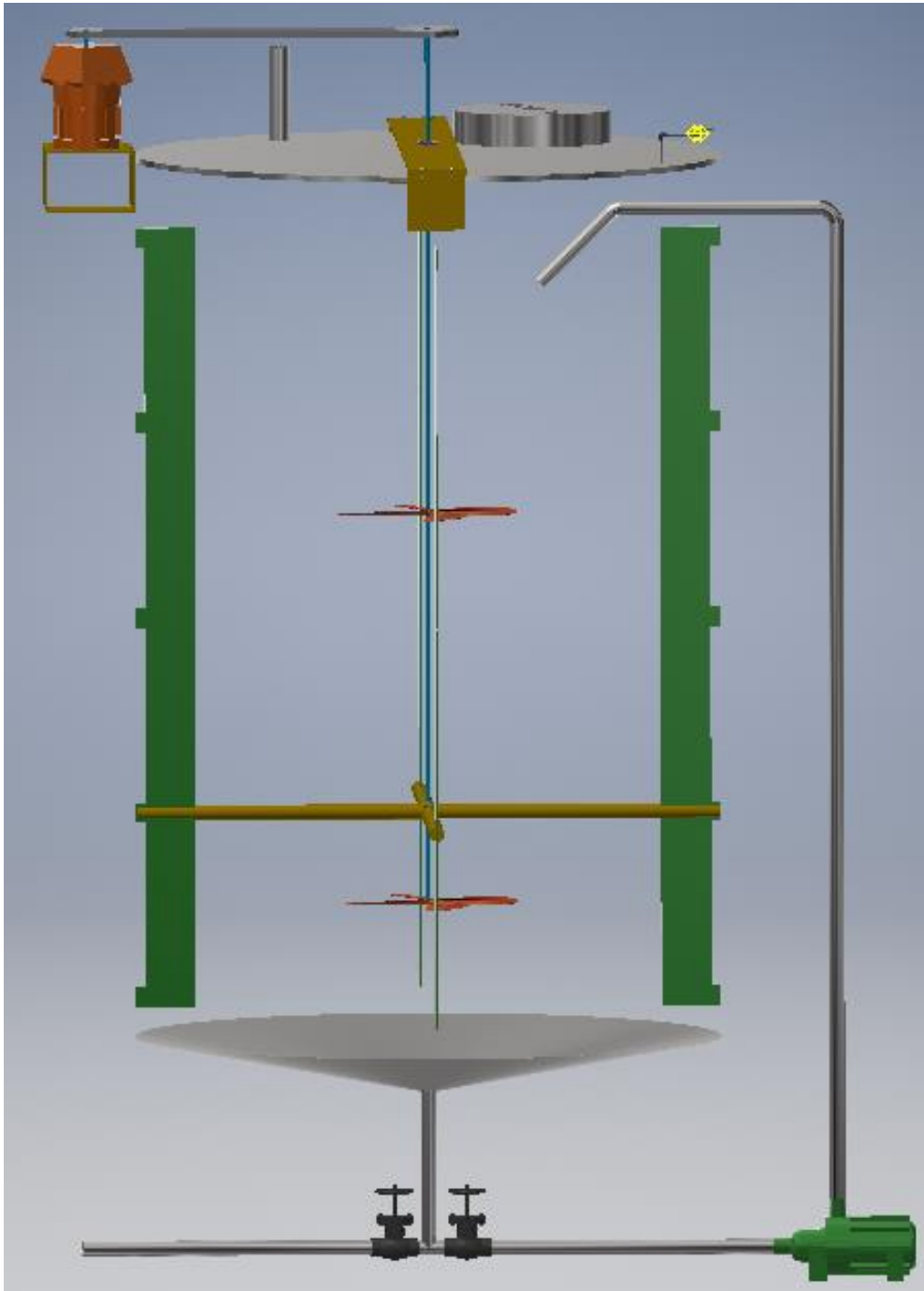
Fuente: elaboración propia, programa Autodesk Inventor 2017.

Figura 36. **Tanque prepurificador vista superior**



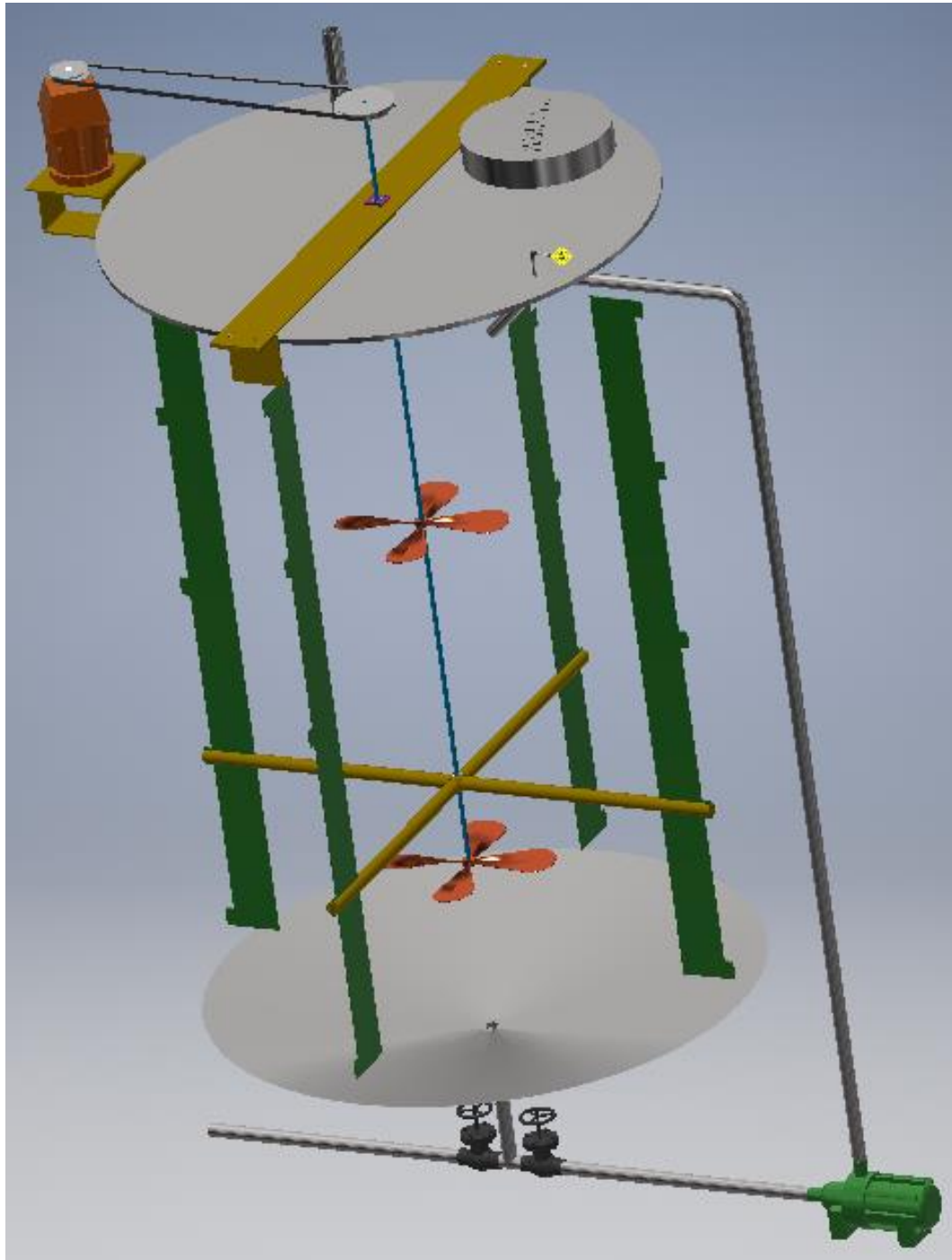
Fuente: elaboración propia, programa Autodesk Inventor 2017.

Figura 37. **Imagen de tanque prepurificador sin chaqueta**



Fuente: elaboración propia, programa Autodesk Inventor 2017.

Figura 38. Tanque prepurificador sin chaqueta

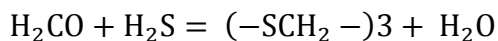


Fuente: elaboración propia, programa Autodesk Inventor 2017.

4. EXPERIMENTO Y RESULTADOS

Por razones económicas y para verificar que el proyecto sea funcional se construirá un tanque piloto. Este tiene una lámina de grosor de 3 175 mm (0,125 plg), muy por arriba del requerimiento de presión del proceso aquí empleado. Se ha adaptado un motor de 1/10 HP con un agitador tipo tijera. Además, se empleó una bomba de recirculación centrífuga con sello magnético.

Se aplica 0,5 % de formaldehído (H_2CO), el cual no se mezcla fácilmente con el petróleo y más bien se genera una micro emulsión que ataca al H_2S , según la ecuación indicada:



Ambos productos resultantes quedan dispersos en el crudo y mantienen una micro emulsión que no es separable por drene (parte inferior del reactor) ni por decantación (parte superior del reactor). El crudo utilizado para todas las pruebas cumplía con las especificaciones detalladas por el MEM. Dicho informe con análisis del MEM se encuentra en la sección de Anexos.

Se empleó un reactor de acero inoxidable en la sección cilíndrica (h 35 cm y d 39 cm) con tapadera y fondo cóncavo y convexo (profundidad interna de platos 3 cm), equipado con un motor de 1/10 HP que gira a 1 750 RPM, con juego de poleas que reducen la velocidad del agitador a 100 rpm. La circulación se produjo con una bomba centrífuga con unión magnética (Iwaki, sin sello) de 1/16 HP con agitador y carcasa de fibra de carbono (caudal 3,2 GPM y máxima elevación de cabeza de 25,6 pies).

En un reactor piloto con capacidad de 38L, se cargaron 10L de crudo Atzam (36 API) seguidos de 50 ml de formalina. Esta mezcla, al someterse a agitación, forma una micro emulsión. Se hacen muestreos periódicos de la masa de petróleo en un recipiente hermético y en cada caso se determina la concentración de H₂S con un detector SenSorcon, cuya lectura es en ppm.

En el presente estudio la agitación fue hecha de tres formas distintas, todas en un ambiente controlado, con los mismos tiempos de medición. Además, la misma cantidad de crudo y formalina. La única variable fue el bombeo y la agitación dados a continuación:

- Únicamente bombeo de circulación (ver Tabla V)
- Únicamente agitación con agitador (ver Tabla VI)
- Agitación con agitador (rpm) y bombeo de circulación simultáneo (ver Tabla VII)

Tomando en cuenta las tablas mencionadas anteriormente, a continuación, se puede ver todo lo utilizado en la planta piloto para poder obtener los resultados.

Figura 39. **Equipo utilizado en planta piloto**



Fuente: elaboración propia

Figura 40. **Crudo Atzam 36 grados API**



Fuente: elaboración propia.

Figura 41. **Reactor piloto 12 galones**



Fuente: elaboración propia.

Figura 42. **Reactor piloto con crudo Atzam y datos**



Fuente: elaboración propia.

Figura 43. **Bomba centrífuga**



Fuente: elaboración propia

4.1. Análisis de datos

Para analizar los datos se efectuaron tres pruebas diferentes, todas con duración de una hora y crudo con 800 ppm de H₂S. La primera prueba fue el tanque a escala, únicamente con sistema de bombeo circulatorio. Segunda fue el mismo tanque, únicamente con sistema agitación de motor con agitador, o sea el sistema tradicional.

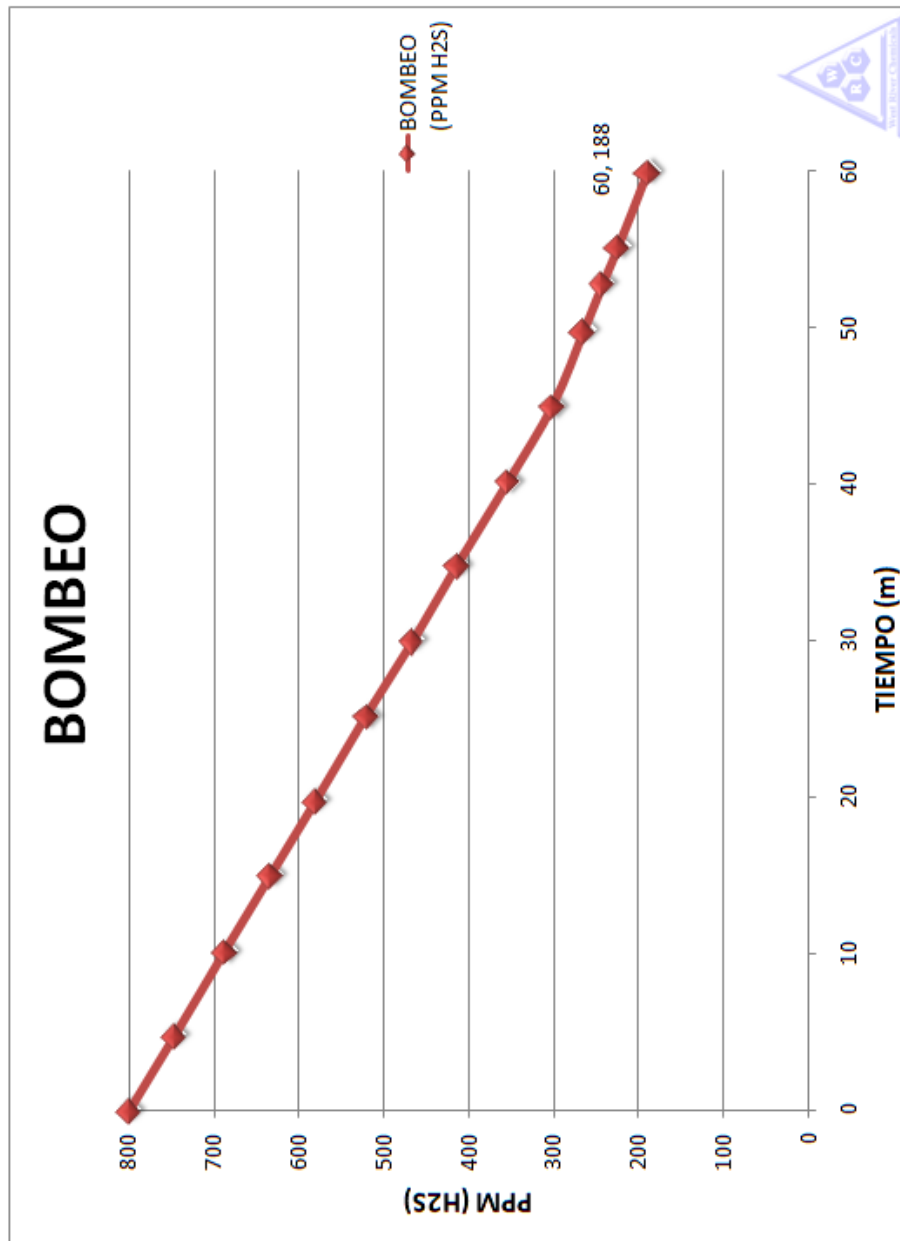
Por último, se empleó un conjunto de bomba de circulación con agitador movido por un motor. Estas tres modalidades se efectuaron con el fin de comparar datos y comprobar la eficiencia del sistema dual planteado en la presente tesis.

Tabla V. **Bombeo crudo 36 grados API**

BOMBEO CRUDO 36 GRADOS API	
T (m)	BOMBEO (PPM H₂S)
0	800
4,8	746
10,2	686
15	633
19,8	580
25,2	520
30	466
34,8	413
40,2	353
45	300
49,8	264
52,8	242
55,2	223
60	188

Fuente: elaboración propia, programa Excel.

Figura 44. **Bombeo crudo 36 grados API**



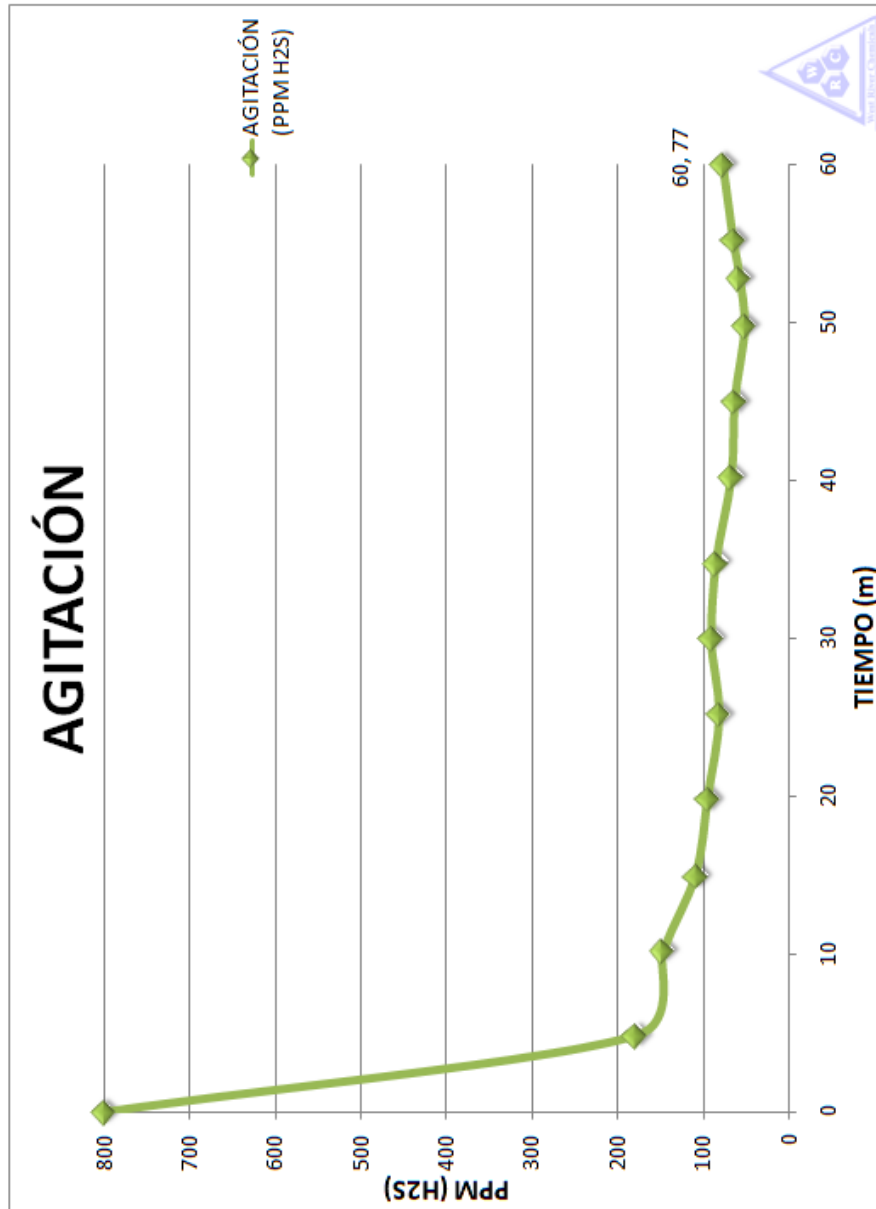
Fuente: elaboración propia, programa Excel.

Tabla VI. **Agitación crudo 36 grados API**

AGITACIÓN ROTOR 36 GRADOS API	
T (m)	AGITACIÓN (PPM H₂S)
0	800
4,8	178
10,2	147
15	108
19,8	94
25,2	81
30	90
34,8	84
40,2	66
45	62
49,8	51
52,8	57
55,2	64
60	77

Fuente: elaboración propia, programa Excel.

Figura 45. Agitación rotor crudo 36 grados API



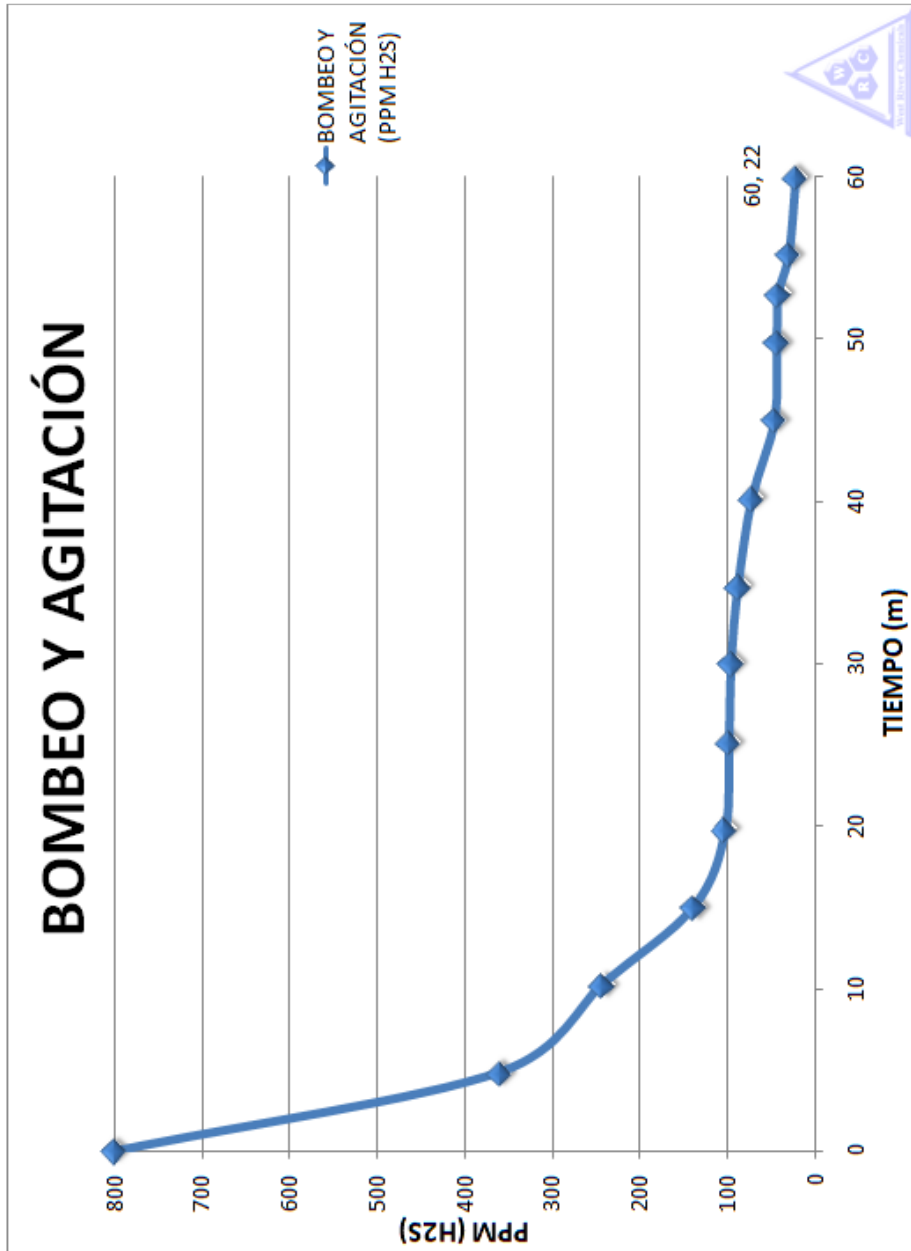
Fuente: elaboración propia, programa Excel.

Tabla VII. **Bombeo con agitación crudo 36 grados API**

BOMBEO CON AGITACIÓN	
T (m)	BOMBEO Y AGITACIÓN (PPM H₂S)
0	800
4,8	360
10,2	242
15	138
19,8	102
25,2	98
30	95
34,8	87
40,2	72
45	46
49,8	43
52,8	41
55,2	30
60	22

Fuente: elaboración propia, programa Excel.

Figura 46. **Bombeo con agitación crudo 36 grados API**



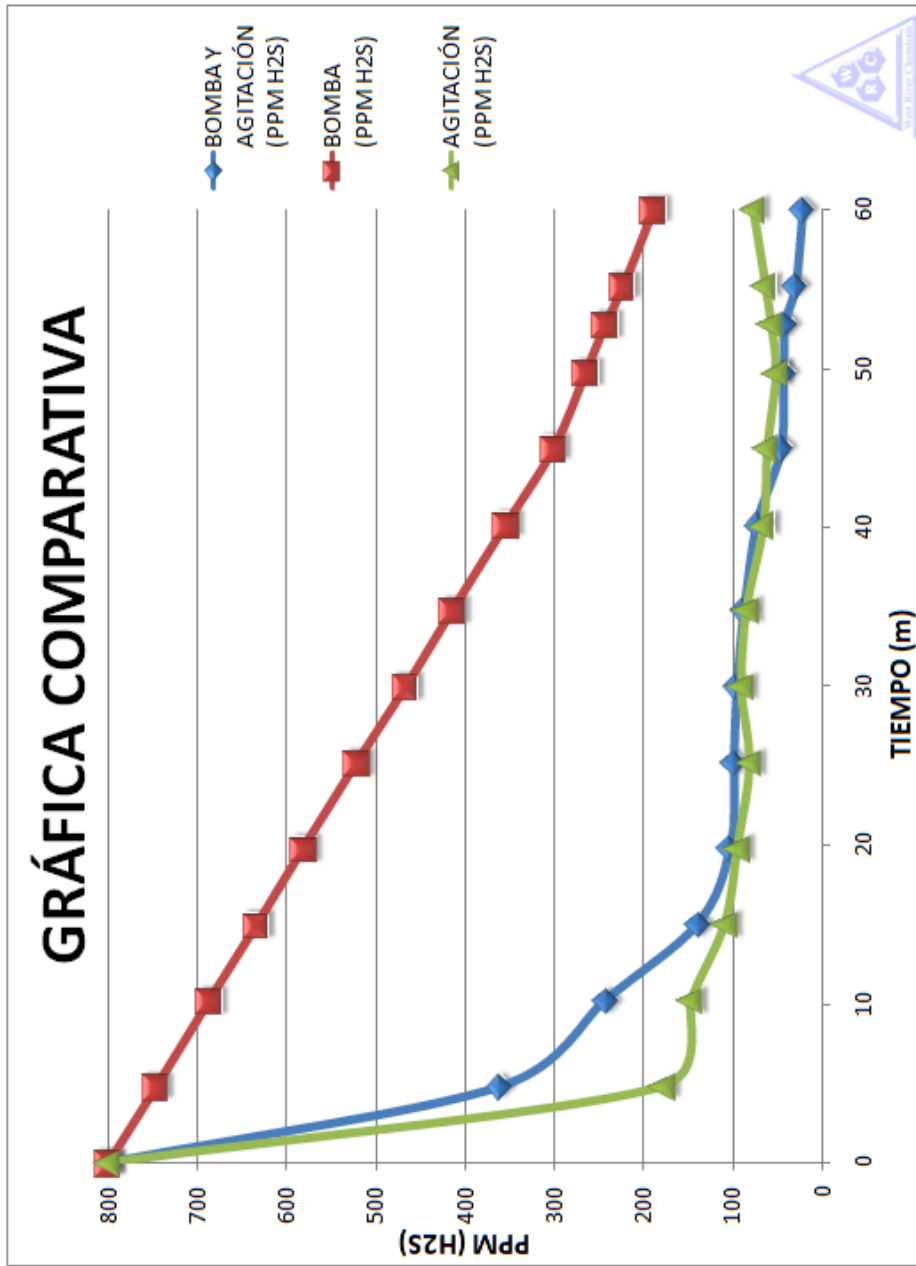
Fuente: elaboración propia, programa Excel.

Tabla VIII. **Tabla comparativa de pruebas con crudo 36 grados API**

T (m)	BOMBA Y AGITACIÓN (PPM H₂S)	BOMBA (PPM H₂S)	AGITACIÓN (PPM H₂S)
0	800	800	800
4,8	360	746	178
10,2	242	686	147
15	138	633	108
19,8	102	580	94
25,2	98	520	81
30	95	466	90
34,8	87	413	84
40,2	72	353	66
45	46	300	62
49,8	43	264	51
52,8	41	242	57
55,2	30	223	64
60	22	188	77

Fuente: elaboración propia, programa Excel

Figura 47. Gráfica comparativa de pruebas con crudo 36 grados API



Fuente: elaboración propia, programa Excel

4.2. Discusión de resultados

Las gráficas muestran la acción dominante del sistema de agitación, el cual crea movimiento constante en la masa entera del petróleo API 36. Sin embargo, no es del todo eficiente, y es necesaria una contribución auxiliar para un mejor contacto a nivel de “gotas” entre el petróleo y los agentes que atacan al H_2S .

En el presente trabajo se ha hecho una mejora al promover agitación adicional por medio de una bomba centrífuga que, a la vez, recircula el petróleo en su retorno. La mezcla que se agita es tipo “agua y aceite”, en el sentido de que no se mezclan en forma íntima. Por ello es importante el complemento de bomba centrífuga al agitador.

Si únicamente se bombea y recircula la masa del petróleo, el resultado es realmente lento, retardado y altamente ineficiente, pues no se mueve el producto en su totalidad. Sin embargo, aun así, se obtienen ciertos resultados como lo demuestra la gráfica. Esto se debe a que, dentro de la masa mayor de petróleo, existe una pequeña cantidad que, si se llega a mezclar íntimamente, de forma gradual se acumula como resultado del retorno de la bomba.

Por otro lado, si se emplea únicamente la agitación con un agitador adecuado, se mueve la masa total de petróleo y empieza a reaccionar de forma muy rápida. Sin embargo, a medida que avanza la reacción de desulfurización, se observa cierto rezago, particularmente en las etapas finales del proceso.

Cuando se emplea conjuntamente el agitador y la bomba centrífuga de recirculación, se observa una clara mejora en el desempeño del proceso, particularmente en las etapas finales del mismo. Esto se debe a que la masa

total de petróleo llega a mezclarse muy íntimamente por la acción de la bomba centrífuga. En las etapas finales es muy importante que se mezcle todo muy bien, íntimamente, dado que es un sistema de “agua y aceite” y, por lo tanto, se cumple con dicho objetivo. La bomba centrífuga “captura” en forma continua cantidades pequeñas de la mezcla procesada, las revuelve en forma íntima y llegan a reaccionar en su totalidad.

CONCLUSIONES

1. Cuando la agitación merece tratamiento especial, como en el caso de mezclar “agua y aceite”, el uso de un agitador con agitación y el de una bomba centrífuga de recirculación se vuelven funciones mecánicas complementarias.
2. El agitador es capaz de mover grandes cantidades de líquido, pero no necesariamente confiere contacto íntimo a la mezcla agitada.
3. La bomba centrífuga de circulación no crea un movimiento tan amplio de la masa agitada, pues su caudal restringe esta acción; sin embargo, sí promueve el contacto íntimo de la mezcla agitada por las altas fuerzas de corte del agitador dentro del área confinada de la carcasa.
4. Se encontró que la forma más eficaz de alcanzar en una hora los niveles deseados de H_2S en el orden de 20 ppm es mediante la combinación de agitación y bombeo circulante.
5. El método de agitación por sí solo, no permite lograr rápidamente los niveles esperados de H_2S , alcanzando como mínimo un valor de 100ppm; adicionalmente, el uso exclusivo de una bomba circulante da un resultado aún más ineficaz, alcanzando valores mínimos de 200 ppm.
6. Para el presente proceso de remoción del H_2S en los petróleos relativamente livianos como el API 36, es altamente recomendable complementar la agitación por agitador con una recirculación por bomba centrífuga de fondo a cielo superior del tanque o reactor.

RECOMENDACIONES

1. Para el tratamiento de petróleo crudo e hidrocarburos en general, con agentes o sustancias disueltas en agua, se recomienda la agitación mediante sistemas motorizados con hélices, auxiliados por un sistema de bombeo circulatorio con bomba centrífuga.
2. Utilizar bombeo y circulación para lograr una mezcla perfecta. Estos son sistemas complementarios para aumentar la eficiencia del contacto de sustancias que de otra forma no se mezclan bien entre sí.

BIBLIOGRAFÍA

1. ABB. *Single Phase Baldor Motors*. [en línea]. <<https://www.baldor.com/catalog#category=315>>. [Consulta junio 2018]
2. HENDERSON, James Neil. *Polymerization Reactors and Processes*. Ohio: American Chemical Society. (1978). 407 p.
3. Grainger, *General Purpose AC Motors (DAYTON)*. [en línea]: <https://www.grainger.com/search/motors/general-purpose-ac-motors/general-purpose-acmotors?attrs=Phase%7C1&filters=attrs&searchQuery=dayton+motors&sst=1&ts_optout=true>. [Consulta junio 2018].
4. PIERR, A *Design and Construction of Large, Welded, Low-Pressure Storage Tanks API 620*. Washington, D.C.: API Publishing Services. (2002). 194 p.
5. PIERR, A *Welded Tanks for Oil Storage API 650*. Washington, D. C.: API Publishing Services. (2007). 449 p.
6. KALICHEVSKY, Vladimir A. *Chemical Refining of Petroleum*. United States of America: American Chemical Society Monograph Series. (1942). 350 p.
7. KIRK, Othmer. *Concise Encyclopedia of Chemical Technology* 3a ed. New York: Wiley-Interscience Publication. (1985). 300 p.

8. Labor, U. S. (2016). *Occupational Safety and Health Administration*. [en línea]<<https://www.osha.gov/SLTC/hydrogensulfide/standards.html>>. [Consulta junio 2018]
9. Mirzakis, Marcel. *The Oil Encyclopedia*. London: Chapman & Hall, LTD. (1922). 545 p.
10. Perry, John H. *Chemical Engineer's Handbook* 4a ed. New York: McGraw-Hill Book Company (1972). 1 242 p.

ANEXOS

Anexo 1. Límites para exponerse ante el H₂S

ALERT [Upcoming Free Webinar: Qualifying Contractors: Risks & Best Practices | Thurs., Sep. 27 at 1PM \(ET\)](https://www.safeopedia.com/reg/qualifying-contractors-risks-best-practices/7353?utm_campaign=CQN&utm_source=TopLink&utm_content=Webinar) (https://www.safeopedia.com/reg/qualifying-contractors-risks-best-practices/7353?utm_campaign=CQN&utm_source=TopLink&utm_content=Webinar).

H2S Exposure Limits

Definition - What does *H2S Exposure Limits* mean?

H₂S (Hydrogen Sulfide) is a highly toxic gas that can kill or seriously harm human health when exposed to it, even at low concentrations like 10 parts per million (ppm). H₂S is normally found in the oil and gas fields (well drilling, servicing, work over, down hole maintenance, plug and abandonment procedures etc.) or in the storage tanks and transports of such substances that releases H₂S.

[Free Webinar: Qualifying Contractors: Risks & Best Practices | Thurs., Sep. 27 at 1PM \(ET\)](https://www.safeopedia.com/reg/qualifying-contractors-risks-best-practices/7353?utm_campaign=CQN&utm_source=TermLink&utm_content=Webinar)
(https://www.safeopedia.com/reg/qualifying-contractors-risks-best-practices/7353?utm_campaign=CQN&utm_source=TermLink&utm_content=Webinar).

Safeopedia explains *H2S Exposure Limits*

OSHA Permissible Exposure Limits (PEL) for H₂S are listed below for conditions stated:

- General industry - up to 20 ppm.
- Exceptions - may exceed 20 ppm if no other exposures during 8 hour work shift, but not more than 50 ppm for a single time exposure for 10 minutes.
- Construction industry - up to 10 ppm
- Maritime industry - 10 ppm

American Conference of Governmental Industrial Hygienists (ACGIH) Threshold Limit Value (TLV) - 1 ppm and for Short Term Exposure Limit (STEL) 5 ppm National Institute for Occupational Safety and Health (NIOSH)

Recommended Exposure Limit (REL) - 10 ppm (10 Minutes)

H₂S exposure can be monitored by the following instruments:

1. Personal H₂S monitor - worn by individuals, provides continuous monitoring and audible warning.
2. Continuous fixed H₂S monitoring systems - fixed at workplaces and used for continuous H₂S concentration monitoring. It provides audible alarms.

Fuente: SafePedia. *H2S Exposure Limits*

Anexo 2. Resultados de análisis MEM ATZAM 36 Grados API

LABORATORIOS TECNICOS		RESULTADOS DE ANALISIS		PAGINA 1 DE (1) LAB-REP-2186-15 ORDEN No. 1-0993-15 GUATEMALA, 04-07-15	
Gobierno de Guatemala					
<p>MUESTRA: Petróleo PRESENTADA POR: Latin American Resources RESPONSABLE DEL MUESTREO: Latin American Resources PROCEDENCIA: Latin American Resources. Referencia de la muestra: Pozos Atzam 4 LOCALIZACION: Kilómetro 15.5, Carretera a El Salvador, Carretera a Santa Catarina Pinula FECHA DE MUESTREO: 26-11-15 FECHA DE RECEPCION DE MUESTRA Y PAPELERIA: 27-11-15 FECHA DE ANALISIS: del 01 al 04-12-15 PRECIO DE ANALISIS: \$ 77.00 ANALISTA: Roderico Zapeta</p>					
DESCRIPCION	METODO DE ANALISIS	ESPECIFICACION (a)	RESULTADOS (b)		
AGUA POR DESTILACION, % volumen	ASTM D-95	-----	0.30		
AZUFRE, % masa	ASTM D-563	-----	1.70		
PODER CALORIFICO SUPERIOR, MJ/Kg	ASTM D-240	-----	(d) 44.11		
GRAVEDAD API, 15.56 °C, °API	ASTM D-287	-----	35.6		
GRAVEDAD ESPECIFICA, 15.56°C	ASTM D-287	-----	0.8458		
VISCOSIDAD CINEMATICA, 32.7 °C, mm ² /s (c)	ASTM D-445	-----	4.3		
CENIZA, % masa	ASTM D-482	-----	0.006		
AGUA Y SEDIMENTO, % volumen	ASTM D-1796	-----	0.30		
DESTILACION, 760 mm Hg en base a recuperado, °C	ASTM D-86	-----	VOLUMEN %	RECUPERADO °C	
			PUNTO INICIAL		
			5	68	
			10	84	
			20	105	
			30	153	
			40	207	
			40	249	
			50	302	
			60	359	
			70	388	
			80	390	
			85% descompondo	405	
<p>OBSERVACIONES:</p> <p>a) En el Acuerdo Ministerial No. 334-2015 no existen especificaciones para este producto. b) Los resultados son válidos solo para el volumen de muestra presentada en este laboratorio. c) 1 mm²/s es equivalente a 1 cSt. d) El valor de 44.11 MJ/Kg es equivalente a 10530 Kcal/Kg y a 18696 Btu/Lb.</p>					
		 Ing. Julio Villacinda AREA DE HIDROCARBUROS			
 Vo. Bo. Inga. Mery Villatoro COORDINADORA LABORATORIOS TECNICOS					
<p>El presente informe no puede ser modificado ni reproducido sin autorización del Laboratorio Técnico</p>					
<p>Diagonal 17, 29-78 zona 11 Colonia las Charcas, Guatemala. Teléfono: (502) 2419-6464</p>					
<p>www.mem.gob.gt</p>					

Fuente: Ministerio de Energía y Minas Guatemala: Resultados de Análisis ATAM