



UNIVERSIDAD JOSÉ ANTONIO PÁEZ

**ESTUDIO DINÁMICO DE UNA BOMBA
TRIPLEX PARA DESPLAZAR FLUIDOS
VISCOELÁSTICOS UTILIZANDO
MÉTODOS DE ELEMENTOS FINITOS**

Autores:

Rakan El Atrache

Celso Vázquez

Urb. Yuma II, calle N°3. Municipio San Diego

Teléfono: (0241) 8714240 (master) – Fax: (0241) 8712394

REPÚBLICA BOLIVARIANA DE VENEZUELA
UNIVERSIDAD JOSÉ ANTONIO PÁEZ
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA
CARRERA: INGENIERÍA MECÁNICA

**ESTUDIO DINÁMICO DE UNA BOMBA TRIPLEX PARA DESPLAZAR
FLUIDOS VISCOELÁSTICOS UTILIZANDO
MÉTODOS DE ELEMENTOS FINITOS**

Proyecto de Trabajo de Grado para optar al título de
INGENIERO MECÁNICO

Autores:

Rakan El Atrache

C.I 27.331.063

Celso Vázquez

C.I 28.356.230

Tutor: Ing. Gruber A. Caraballo V.

San Diego, Julio 2020



Universidad José Antonio Páez
Decanato de Ingeniería

FI-M -001-2020-1CR (TG)

Valencia, 08 de junio de 2020

Ciudadano:
El Atrache C, Rakan J.
27.331.063
Vasquez V, Celso J.
28.356.230
Presente-

Cumplo con informarle que la Comisión de Trabajo de Grado y Pasantías de la Facultad de Ingeniería en su reunión N.º **02-2020** de fecha **11-02-2020** aprobó el proyecto de trabajo de grado titulado ***ESTUDIO DINÁMICO DE UNA BOMBA TRIPLEX PARA DESPLAZAR FLUIDOS VISCOELÁSTICOS UTILIZANDO METODOS DE ELEMENTOS FINITOS*** presentado por usted (es) como requisito para optar al título de Ingeniero Mecánico.

Se ratifica la designación del Ing. Gruber Caraballo C.I: 12.014.408 como Tutor Académico que lo asesoraran en el desarrollo de este proyecto.

Atentamente,



Prof. Luis Lira

Decano de la Facultad de Ingeniería

c.c. Coordinación de Pasantías y Trabajo de Grado (1).



REPÚBLICA BOLIVARIANA DE VENEZUELA
UNIVERSIDAD JOSÉ ANTONIO PÁEZ
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA

ACEPTACIÓN DEL TUTOR

Quien suscribe, Ingeniero Gruber Caraballo portador de la cédula de identidad N° V- 12.014.408, en nuestro carácter de tutor del Trabajo de Grado presentado por los ciudadanos El Atrache Ceballos Rakan De Jesús, portadora de la Cédula de Identidad N° V-27.331.063, y Vázquez Villavicencio Celso José, portador de la Cédula de Identidad N° V-28.356.230 titulado **ESTUDIO DINÁMICO DE UNA BOMBA TRIPLEX PARA DESPLAZAR FLUIDOS VISCOELÁSTICOS UTILIZANDO MÉTODOS DE ELEMENTOS FINITOS**. Presentado como requisito parcial para optar al título de Ingeniero Mecánico, considero que dicho trabajo reúne los requisitos y méritos suficientes para ser sometido a la presentación pública y evaluación por parte del jurado examinador que se designe.

En San Diego, a los 29 días del mes de junio del año dos mil veinte

Ing. Gruber A. Caraballo V.

V- 12.014.40

AGRADECIMIENTOS

A Dios, porque a pesar de cualquier obstáculo me otorgo la fortaleza y persistencia que se necesitaba. A mis padres, Rakan y Omaira, por haberme apoyado bajo cualquier circunstancia y haber inculcado en mí, los valores que me han permitido alcanzar esta meta. A mi hermano Abdullah, por ser el ejemplo y faro de constancia y excelencia que me guio en todo momento. A mi tutor académico Gruber Caraballo por sus enseñanzas a lo largo de mi carrera. A mis amigos, a mi compañero de trabajo de grado y a mi novia por su apoyo a lo largo del tiempo.

Rakan El Atrache

Primeramente, quiero agradecer a Dios pues sin él nada de esto fuese sido posible, además le agradezco por darme fuerzas para seguir adelante en los momentos que pensé que no podía más. Al apoyo incondicional de mis padres, Johnny Vázquez y María Villavicencio, quienes nunca dudaron de mí y sin importar que, estuvieron allí para mí, siendo mis pilares fundamentales; a mi hermana y hermano, María Vázquez y Jhonny Vázquez, ya que en todo momento recibí sus buenas energías y deseos, además no hubo un momento en el que no estuviesen al pendiente del progreso del trabajo. Quiero agradecer a mis amigos, José Alvarado, Katherine López, Rubén Rivas, Oscar Quevedo, Vito Martinelli y Ricardo Perrotta, porque ustedes son esa familia que obtuve en la universidad y sinceramente si ustedes no me hubiesen ayudado y apoyado no sé hasta dónde fuese llegado. Le agradezco a mi tutor académico el Ing. Gruber Caraballo por las lecciones y los consejos dados. A mi familia en general porque siempre aumentaron mi confianza y estuvieron al pendiente de mí. Y, por último, pero no por eso menos importante, le doy las gracias a mi amigo y compañero de investigación Rakan El Atrache, por haber afrontado este reto y muchos más, codo a codo, porque no pudo haber una mejor persona a la que pude escoger para lograr esta meta.

Celso Vázquez

DEDICATORIA

A mi Abuelo Abdullah, por su amor inagotable. A mi hermana María, para que sepa que si su determinación es lo suficientemente grande no habrá meta imposible.

Rakan El Atrache

A Dios por darme la salud y las ganas de seguir alcanzando metas. A mis padres y hermanos por ser ese apoyo incondicional y estar allí cuando mas los necesite. A mis amigos por siempre recordarme que no estoy solo.

Celso Vázquez

ÍNDICE GENERAL

CONTENIDO	pp.
LISTA DE FIGURAS	x
LISTA DE GRÁFICAS	xiii
RESUMEN INFORMATIVO	xiv
INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO	
I EL PROBLEMA	
1.1 Planteamiento del Problema	3
1.2 Formulación del Problema	4
1.3 Objetivos de la Investigación	4
1.3.1 Objetivo General	5
1.3.2 Objetivos Específicos	5
1.4 Justificación	5
1.5 Limitaciones	5
1.6 Alcance	6
II MARCO TEÓRICO	
2.1 Antecedentes de la Investigación	7
2.2 Bases Teóricas	9
2.2.1 Fluido Viscoelástico	9
2.2.2 Fluidos de Perforación	10
2.2.3 Funcionamiento de los Fluidos de Perforación	11
2.2.4 Ciclo de Vida del Fluido de Perforación	12
2.2.5 Tipos de Fluidos de Perforación	15
2.2.6 Fluidos de Perforación Viscoelásticos	16
2.2.7 Sistema Viscoelástico	17
2.2.8 Reología de los Fluidos de Perforación	18

2.2.8.1 La ley de la Potencia.....	18
2.2.8.2 Modelo de Herschel-Bulkley	19
2.2.8.3 Modelo de Herschel-Bulkley-Papanastasiou	19
2.2.9 Régimen de Flujo de los Fluidos de Perforación.....	20
2.2.10 Bomba reciprocante	20
2.2.11 Bomba Triplex	21
2.2.12 Componentes Principales.....	21
2.2.13 Comportamiento hidráulico de la bomba.....	28
2.2.14 Cálculo de Caudal de Bombeo.....	29
2.2.15 Dinámica Computacional de Fluidos (CFD).	29
2.2.16 Componentes de un CFD	30
2.2.17 Ecuaciones de Navier-Stokes.	34
2.3. Definición de Términos Básicos	35I
III MARCO METODOLÓGICO	
3.1 Tipo de investigación	36
3.2 Diseño de investigación.....	37
3.3 Nivel de la investigación	38
3.4 Población y muestra	38
3.4.1 Población	38
3.4.2 Muestra	39
3.5 Técnicas e instrumentos de recolección de datos.....	40
3.6 Fases de la Investigación	41
IV RESULTADOS	
4.1 Revisión de las características de los fluidos perforación viscoelásticos que permitan la selección de un sistema en particular.	43
4.2 Caracterización de los elementos constitutivos de una bomba de desplazamiento positivo triplex.....	44
4.3 Modelado de la geometría de una bomba triplex mediante el uso de una herramienta CAD.....	47

4.3.1	Proceso de Diseño del Modelo	¡Error! Marcador no definido.
4.3.1.1	Power End.....	¡Error! Marcador no definido.
4.3.1.2	Fluid End	¡Error! Marcador no definido.
4.3.1.3	Ensamble de la Bomba	¡Error! Marcador no definido.
4.4	Simulación del flujo viscoelástico en la geometría seleccionada y diseñada utilizando la herramienta de CFD.....	60
4.4.1	Condiciones Generales del Estudio	60
4.4.2	Simulación de la Etapa de Carga	62
4.4.2.1	Importado de la Geometría	62
4.4.2.2	Parámetros y Variables de la Etapa de Carga	63
4.4.2.3	Dominio, Propiedades y Condiciones de Contorno.....	64
4.4.2.4	Mallado del Modelo.....	68
4.4.2.5	Configuración del Estudio Estacionario.	69
4.4.3	Simulación de la Etapa de Descarga.....	70
4.4.3.1	Importado de la Geometría	70
4.4.3.2	Parámetros y Variables de la Etapa de Carga	70
4.4.3.3	Dominio, Propiedades y Condiciones de Contorno.....	72
4.4.3.4	Mallado del Modelo.....	74
4.4.3.5	Configuración del Estudio Estacionario.	75
4.5	Análisis de los resultados obtenidos en la simulación mediante el uso de datos y gráficos.	76
4.5.1	Resultados de la Etapa de Carga.....	77
4.5.2	Resultados de la Etapa de Descarga	83
	CONCLUSIONES	91
	RECOMENDACIONES	93
	REFERENCIAS	94

LISTA DE FIGURAS

FIGURA	pp.
1 Ciclo del lodo de perforación y sus partes.....	13
2 Componentes principales Bomba triplex.....	21
3 Caja reductora.....	22
4 Power end	23
5 Power end (vista isométrica).....	23
6 Componentes del Cigüeñal.....	24
7 Partes de una biela.....	25
8 Fluid End.....	26
9 Flujo a través del Fluid End.....	26
10 Ejemplo de un mallado 2D, estructurado, no ortogonal.....	32
11 Ejemplo de un mallado 2D estructurado en bloque.....	32
12 Ejemplo de un mallado sin estructura 2D.....	33
13 Resultados reológicos experimentales.....	43
14 Leyenda de las características del fluido de perforación viscoelástico.....	44
15 Especificaciones Modelo FD-1600.....	45
16 Dimensiones generales Modelo FD-1600.....	45
17 Vista Frontal Bomba Triplex modelo FD-1600.....	46
18 Vista lateral Bomba Triplex modelo FD-1600.....	46
19 Carcasa Power End.....	47
20 Cigüeñal Power End.....	48
21 Ensamble Power End.....	48
22 Croquis (al fondo) y extrusión 1 (Amarillo) de las tuberías de salida.....	49
23 Croquis y extrusión 2, del Manifold de Alta.	50

24	Corte 1, Manifold de Alta.....	50
25	Croquis 3, Manifold de Alta.....	50
26	Extrusión 3 y Mirror 1, Manifold de Alta.....	51
27	Croquis 4, Corte 2 y Mirror 2, Manifold de Alta.....	51
28	Croquis 1 y Extrusión 1, Manifold de Baja.....	51
29	Croquis 2 y Extrusión 2, Manifold de Baja.....	52
30	Croquis y Extrusión 3, Manifold de Baja.....	52
31	Mirror 1, Manifold de Baja.....	53
32	Croquis 4, Corte y Mirror 2, Manifold de Baja.....	53
33	Tapas Frontales.....	53
34	Croquis y Revolución, Vástago - Pistón.....	54
35	Croquis y Operaciones de la Cámara del Vástago - Pistón.....	54
36	Croquis y Extrusión 1, Cámara de Flujo.....	55
37	Plano 1 y Croquis 2, Cámara de flujo.....	55
38	Corte en revolución 1, Cámara de Flujo.....	56
39	Croquis 3 y Corte en revolución 2, Cámara de flujo.....	56
40	Croquis 4 y Croquis 5, Cámara de Flujo.....	57
41	Corte de barrido, Cámara de Flujo.....	57
42	Corte de barrido, Cámara de Flujo.....	58
43	Corte Transversal de la Cámara de Flujo, Etapa de Carga.....	59
44	Corte Transversal de la Cámara de Flujo, Etapa de Descarga.....	59
45	Ensamble Final Bomba Triplex FD-1600.....	60
46	Selección de Procedimiento y Dimensión Espacial del Archivo.....	61
47	Selección de la Física del Modelo.....	61
48	Selección de Procedimiento y Dimensión Espacial del Archivo.....	62
49	Importado de la Geometría del Dominio Fluidizado, Etapa de Carga....	63
50	Parámetros de la Simulación, Etapa de Carga.....	63
51	Función Analítica del Movimiento del Pistón, Etapa de Carga.....	64

52	Variable que Describe la Velocidad del Pistón, Etapa de Carga.....	64
53	Propiedades y Ecuaciones del Fluido de Perforación Viscoelástico.....	65
54	Paredes Fijas, Etapa de Carga.....	66
55	Pared Móvil, Etapa de Carga.....	66
56	Condición de Entrada (Inlet), Etapa de Carga.....	67
57	Condición de Salida (Outlet), Etapa de Carga.....	68
58	Mallado, Etapa de Carga.....	68
59	Configuración del Estudio, Etapa de Carga.....	69
60	Importado de la Geometría del Dominio Fluidizado, Etapa de Descarga...	70
61	Parámetros de la Simulación, Etapa de Descarga.....	71
62	Función Analítica del Movimiento del Pistón, Etapa de Descarga.....	71
63	Variable que Describe la Velocidad del Pistón, Etapa de Descarga.....	72
64	Función Escalón (Rectángulo) para la Succión, Etapa de Descarga.....	72
65	Paredes Fijas, Etapa de Descarga.....	73
66	Pared Móvil, Etapa de Descarga.....	73
67	Pared Fija con Condición de Deslizamiento, Etapa de Descarga.....	73
68	Condición de Salida (Outlet), Etapa de Descarga.....	74
69	Condición de Entrada (Inlet), Etapa de Descarga.....	75
70	Mallado, Etapa de Descarga.....	75
71	Configuración del Estudio, Etapa de Descarga.....	76

LISTA DE GRÁFICAS

GRÁFICA	pp.
1 Velocidad m/s (a) y Presión Pa (b) en t = 0,01 s.....	77
2 Velocidad m/s (a) y Presión Pa (b) en t = 0,13 s.....	77
3 Velocidad m/s (a) y Presión Pa (b) en t = 0,23 s.....	78
4 Viscosidad Dinámica Pa.s (a) y Viscosidad Cinemática m^2/s (b) en t = 0,13 s.....	79
5 Número de Reynolds de Celda (a) y Zona de Fluencia % (b) en t = 0,001 s....	79
6 Número de Reynolds de Celda (a) y Zona de Fluencia % (b) en t = 0,13 s.....	80
7 Número de Reynolds de Celda (a) y Zona de Fluencia % (b) en t = 0,23 s.....	81
8 Tasa de Cizalladura (Deformación) vs Viscosidad Dinámica, Carga.....	81
9 Magnitud de Vorticidad, Carga.....	82
10 Velocidad m/s (a) y presión Pa (b) en t = 0,251 s.....	83
11 Velocidad m/s (a) y presión Pa (b) en t = 0,331 s.....	83
12 Velocidad m/s (a) y presión Pa (b) en t = 0,491 s.....	84
13 Viscosidad Dinámica Pa.s (a) y Zona de Fluencia % (b) en t = 0,251 s.....	85
14 Viscosidad Dinámica Pa.s (a) y Zona de Fluencia % (b) en t = 0,371 s.....	86
15 Viscosidad Dinámica Pa.s (a) y Zona de Fluencia % (b) en t = 0,491 s.....	86
16 Viscosidad Cinemática m^2/s en t = 0,371 s.....	87
17 Número de Reynolds de Celda en t = 0,251 s.....	88
18 Número de Reynolds de Celda en t = 0,371 s.....	88
19 Número de Reynolds de Celda en t = 0,491 s.....	89
20 Tasa de Cizalladura (Deformación) vs Viscosidad Dinámica, Descarga.....	89
21 Magnitud de Vorticidad, Descarga.....	90

**REPÚBLICA BOLIVARIANA DE VENEZUELA
UNIVERSIDAD JOSÉ ANTONIO PÁEZ
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA**

**ESTUDIO DINÁMICO DE UNA BOMBA TRIPLEX PARA DESPLAZAR
FLUIDOS VISCOELÁSTICOS UTILIZANDO
MÉTODOS DE ELEMENTOS FINITOS**

Autores: Celso Vázquez; Rakan El Atrache

Tutor: Ing. Gruber A. Caraballo V.

Fecha: junio 2020

RESUMEN INFORMATIVO

Un fluido viscoelástico es un fluido no newtoniano que posee la propiedad de recuperar parte de su estado inicial después de sufrir una deformación. Debido a la poca información de estudios disponibles sobre los fluidos viscoelásticos y dispositivos para desplazarlos, se planteó y procedió a realizar un estudio donde se seleccionaron un fluido de perforación viscoelástico y una bomba para perforación de pozos petroleros en específico. Siendo el enfoque de la investigación entender el comportamiento de un fluido de perforación (comúnmente llamado lodo de perforación) de composición viscoelástica al ser desplazado por una bomba de desplazamiento positivo de pistones lineales Triplex, estudiando las variables dinámicas que intervienen en el fluido viscoelástico. El estudio se realizó utilizando un programa de dinámica de fluidos computacional (CFD por sus siglas en inglés), el cual aplico métodos de elementos finitos (FEM, por sus siglas en inglés) para la solución de las ecuaciones constitutivas del caso en estudio. Este trabajo se encontró respaldado en una investigación documental y de nivel descriptivo, donde se desarrolló una simulación del comportamiento del flujo a través de la cámara de la bomba triplex previamente escogida y modelada para este estudio. Las fases de la investigación fueron: caracterizar los fluidos de perforación viscoelásticos, constituir una bomba Triplex y modelarla mediante la herramienta CAD/CAE SolidWorks, realizar la simulación del flujo del fluido viscoelástico a través de la cámara de flujo de la geometría modelada de la bomba usando el software de FEM COMSOL Multiphysics bajo los parámetros escogidos y el análisis de los resultados arrojados por el estudio.

Palabras clave: Bomba Triplex, Dinámica de fluidos computacional (CFD), Fluido viscoelástico, Mecánica de fluidos, Simulación

INTRODUCCIÓN

Los fluidos no newtonianos son definidos por la reología como aquellos fluidos que al deformarse no presentan una relación lineal con respecto al esfuerzo que se les está aplicando, entre estos, el fluido viscoelástico es aquel que posee la propiedad de recuperar parte de su estado inicial después de sufrir una deformación. La relativa novedad de los viscoelásticos y su uso, causa una importante falta de información e investigaciones en el área, al igual que, escasos estudios de dispositivos que sean capaces de transportarlos para aplicaciones específicas.

En la industria petrolera, específicamente en el área de perforación de pozos petroleros, debido a la creciente demanda de pozos más eficientes y rentables, se creó un método para la perforación donde se introduce un ángulo en el proceso de hasta 90° , llamada perforación direccional. Esta presenta una serie de desafíos importantes que se han podido superar gracias a la introducción de la propiedad viscoelástica. Llamados fluidos de perforación viscoelásticos han ofrecido una serie de ventajas como mejores tasas de remoción de escombros, limpieza en el pozo y estabilidad en la formación que los convirtieron en el estándar para estos procesos.

Ahora, en el área de perforación de pozos, el componente que va de la mano con el fluido de perforación es la máquina que se encarga de desplazarlo a través del sistema, esta es una bomba de desplazamiento positivo de pistones lineales, llamada bomba Triplex. Siendo el corazón de los sistemas de perforación, resulta extraño la falta de estudios sobre el comportamiento que puede presentar ante las distintas variables que se enfrenta en su desempeño, siendo la más importante, el fluido de perforación.

Finalmente, justificándose en la amplia falta de información y estudios sobre lo expuesto anteriormente. Se decidió realizar un estudio de las variables dinámicas de los fluidos de perforación viscoelásticos y su comportamiento cuando son desplazados por las bombas de desplazamiento positivo Triplex utilizando el método de los

elementos finitos (FEM, por sus siglas en inglés) por medio de una herramienta de dinámica de fluidos computacional (CFD, por sus siglas en inglés) para arrojar mayor claridad, datos e información sobre los fluidos viscoelásticos y como pueden llegar a ser afectados por los dispositivos que se encargan de su transporte.

La investigación se divide de la siguiente manera:

En el capítulo I, se formuló el problema a estudiar, se determinó el objetivo general y los objetivos específicos que se deseaban alcanzar en la investigación, junto a la justificación y el alcance de esta.

El capítulo II, contemplo los antecedentes que contribuyeron con información y datos para el desarrollo de la investigación, de igual manera se plasmaron las bases teóricas correspondientes a las ecuaciones constitutivas y los fundamentos teóricos de la herramienta CFD.

El capítulo III, describió la metodología utilizada para desarrollar la investigación, como lo son el propósito, el nivel, el diseño y las fases de la investigación.

El capítulo IV, se respondieron las fases de la investigación, con sus debidas conclusiones y recomendaciones.

CAPÍTULO I

EL PROBLEMA

1.1 Planteamiento del Problema

Desde épocas remotas el hombre ha tenido la necesidad de transportar fluidos para su aprovechamiento en distintas tareas y para ello desarrolló dispositivos y estructuras especializadas para desplazarlos. Al principio era agua, pero con la evolución de la humanidad, las necesidades y las demandas fueron cambiando, los nuevos descubrimientos científicos y el desarrollo tecnológico e industrial conllevaron a crear y descubrir nuevos fluidos con características distintas y comportamientos más complejos, así como nuevos dispositivos y maquinas que pudieran transportarlos en los distintos escenarios que se puedan presentar.

En la industria petrolera, específicamente en el área de perforación de pozos estos nuevos fluidos encontraron una aplicación especial, ya que sus complejas y variadas características encajaban perfectamente para ser utilizados como el fluido que se necesitaba durante el proceso de perforación para traer los residuos del pozo a la superficie y lubricar la broca de perforación. Estos fluidos pertenecen a la clasificación de fluidos no newtonianos, entendiéndose que los fluidos newtonianos son aquellos en donde la relación del esfuerzo cortante y su velocidad de deformación son lineales, los no newtonianos son aquellos en donde esta relación no es lineal.

Entre los procesos de perforación de pozos más complejos se encuentra la perforación de pozos direccionales, donde se introduce un grado de inclinación con respecto a la vertical de hasta 90° causando la necesidad de usar un fluido de perforación más especializado, conocido como fluido de perforación viscoelástico, capaz de exhibir propiedades elásticas y viscosas se ha demostrado que las propiedades que entregan son ideales para la perforación de estas zonas de gran inclinación, disminuyendo los riesgos asociados al proceso y aumentando la eficiencia del mismo.

Como estándar en la industria para desplazar los fluidos de perforación se utiliza una bomba de desplazamiento positivo de pistones lineales conocida como bomba de lodo, donde en su configuración más común, utiliza tres pistones y posee el nombre de bomba Triplex. Ahora, con la introducción de fluidos de perforación viscoelásticos en los sistemas de perforación mucho después de la estandarización de las bombas triplex, nacen las interrogantes de si la interacción entre fluido-bomba ha cambiado y si es en sentido favorable o desfavorable, así como la necesidad de entender con exactitud que ocurre al ser desplazado el fluido, es decir, entender el comportamiento del sistema.

Existen distintas formas de lograr esto, una podría ser de manera experimental, construyendo un banco de prueba y midiendo las variables constitutivas correspondientes, lo cual se traduce en una inversión costosa en cuanto a tiempo y dinero. Otra forma, sería utilizando una simulación computarizada que usa el Método de Elementos Finitos (FEM, por sus siglas en inglés) el cual es un método numérico general para la aproximación de soluciones de ecuaciones diferenciales parciales que generan resultados muy cercanos a los que podrían ser obtenidos experimentalmente.

No existe una data técnica similar a las bombas centrifugas que desplazan agua que funcionen como material de referencia a ingenieros o investigadores que deseen incursionar en el estudio de los fluidos de perforación viscoelásticos, así como tampoco es muy poca la literatura especializada concerniente al comportamiento de una bomba Triplex. Por ende, se plantea estudiar la dinámica de un fluido de perforación al ser desplazado por una bomba de desplazamiento positivo de pistones lineales Triplex con el motivo de ampliar los conocimientos y datos técnicos en este tema.

1.2 Formulación del Problema

¿Cómo es el comportamiento dinámico de un fluido de perforación viscoelástico al ser desplazado por una bomba triplex?

1.3 Objetivos de la Investigación

1.3.1 Objetivo General

Estudiar el comportamiento dinámico de un fluido de perforación viscoelástico al ser desplazado por una bomba Triplex utilizando análisis de elementos finitos.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Revisar las características de los fluidos de perforación viscoelásticos, que permitan la selección de un sistema en particular.
- Caracterizar los elementos constitutivos de una bomba de desplazamiento positivo Triplex.
- Modelar la geometría de una bomba Triplex mediante el uso de una herramienta de diseño asistido por computadora (CAD).
- Simular el flujo viscoelástico en la geometría seleccionada y diseñada utilizando métodos de elementos finitos con una herramienta de dinámica de fluidos computacional (CFD).
- Analizar los resultados obtenidos mediante el uso de gráficas y/o videos.

1.4 Justificación

En la actualidad el uso o manejo de los fluidos viscoelásticos para la perforación de pozos direccionales ha calado en la industria mientras aún se mantiene como estándar el uso de las bombas Triplex en los procesos de perforación. Por lo tanto, el entendimiento del comportamiento dinámico de dichos fluidos y como afecta a la bomba otorgaría una serie de datos numéricos que pueden ser utilizados para futuras investigaciones y/o diseños.

1.5 Limitaciones

- Inexistencia de estudios reológicos de fluidos de perforación en bombas de lodo.
- Escasez de información relacionada con la explicación del funcionamiento de bombas de lodo triplex.

- Los pocos estudios existentes pertenecen a investigaciones de alto nivel de complejidad o “papers” que se encuentran en idiomas distintos al español.

1.6 Alcance

Esta investigación abarco el estudio dinámico de un fluido de perforación viscoelástico al ser desplazado por una bomba de desplazamiento positivo (BDP) de pistones lineales Triplex a través del sistema de perforación, en este sentido no se estudiaron otros tipos BDP como es el caso de la bomba de lóbulos, tornillo, diafragma o membrana, las cuales también tienen la capacidad de impulsar fluidos no-newtonianos, pero en su mayoría aplicando en la industria alimenticia, así como tampoco ningún otro tipo de fluido de perforación no newtoniano que pueda usarse en la industria petrolera.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1 Antecedentes de la Investigación

Las investigaciones en el análisis numérico y en el desarrollo de modelos computacionales para el estudio de la dinámica de fluidos son de data reciente, lo que se traduce en escasas en el desarrollo de investigaciones en función del comportamiento una bomba Triplex y/o del análisis numérico-computacional del estudio de fluidos de perforación viscoelásticos. Algunos de los estudios realizados hasta ahora se basan solo en fluidos de perforación (fluido usado en estas bombas) o en el comportamiento y determinación de las propiedades de un fluido viscoelástico en particular. Algunos otros hablan solo de las bombas que usan pistones como método de aumento de presión en el fluido. Sin embargo, este trabajo de grado tomó como punto de partida:

Malaver A. (2012) en su trabajo especial de grado **“Formulación de un fluido viscoelástico para la perforación de la sección horizontal con aplicación en los campos Bare y Melones del distrito San Tomé”** de La Universidad de Oriente, Venezuela. Estudio y evaluó, la formulación de un fluido viscoelástico para la perforación de la sección horizontal con aplicación en los campos Bare y Melones del Distrito San Tomé. Para ello, inicialmente se formularon varios fluidos viscoelásticos utilizando distintas concentraciones de gomas xánticas y almidones modificados a los cuales se les realizaron pruebas de reología, filtrado API y viscosidad Brookfield, esto último con el uso del viscosímetro Brookfield.

Posteriormente, se seleccionó uno de los fluidos evaluados por cumplir los requerimientos estándares y se comprobó de forma experimental que el modelo reológico que se ajusta al comportamiento real de los fluidos viscoelásticos es el modelo combinado de Herschel-Bulkley. Estos resultados proporcionaron, los datos e

información necesaria para seleccionar el fluido viscoelástico escogido para la presente investigación, así como el modelo a utilizar en el proceso de simulación del flujo.

También, Ortega A., Molero J., Rivas A. y Sánchez V. (2002) en el manual titulado **“Fluidos de Perforación”** realizado en PDVSA Centro Internacional de Educación y Desarrollo (CIED) se instruye sobre evaluar las propiedades del fluido de perforación en forma continua para tomar las decisiones preventivas o correctivas que permitan realizar los ajustes necesarios para mantener las mejores condiciones posibles en la perforación. También, se explica cuáles son los distintos tipos de lodos de perforación que existen, como se diferencian en su composición, cuáles son los aditivos necesarios para su elaboración, con que pruebas experimentales se pueden determinar sus propiedades y como se diferencian sus ventajas y desventajas para saber cuándo deben ser utilizados dependiendo del estrato en que se esté perforando

Aquí, se otorga un excelente manual que permitió sustentar las bases teóricas de los fluidos de perforación, sus modelos y los valores/rangos experimentales estándares de sus variables, así como establecer cuando deben ser utilizados en los procesos de perforación. Confirmando, los planteamientos expresados en el presente trabajo de grado y los valores extraídos de posteriores investigaciones.

Seguidamente, se empleó el manual de Schlumberger (S/F), Titulado **“JET Modulo 2 Bombas Triplex”**, en su versión provisoria, en el cual se explica de manera muy detallada, cuáles son los tipos de bomba triplex, siendo así muy certeros con todo lo que las compone y caracteriza. Además, se expresa la designación genérica de la bomba triplex la cual se le aplica a cualquier tipo de bomba con tres pistones y de cómo las bombas reciprocantes con pistones son las bombas más eficientes para el bombeo de fluidos abrasivos a alta presión (1.000 psi o más) y las que menos mantenimiento requieren.

Permitiendo, tomar en cuenta todos los factores que son importantes en cada uno de estos tipos de bombas, explicando detalladamente los procedimientos de instalación,

ensamble, funcionamiento y criterios que permitan seleccionar y diseñar una bomba triplex adecuada a los requerimientos del pozo.

Por último, Moreno E., Cervera M. (2015), en su artículo científico **“Elementos finitos mixtos estabilizados para fluidos confinados de Bingham y de Herschel-Bulkley. Parte I: Formulación.”** De la Universidad Politécnica de Cataluña, España. Presenta una metodología para la resolución de las ecuaciones de Navier-Stokes para los fluidos no newtonianos de Bingham y de Herschel-Bulkley mediante el método de los elementos finitos estabilizados velocidad/presión. Se desarrolla una formulación teórica y se realiza la implementación computacional. Los fluidos estudiados se caracterizan por presentar una tensión de corte mínima, denominada tensión de fluencia. Por encima de esta tensión de corte mínima el fluido comienza a moverse. En caso de no superarse esta tensión de fluencia, el fluido se comporta como un cuerpo rígido o cuasirrígido, con velocidad de deformación nula.

Finalmente, describe y explica el modelo regularizado de Papanastasiou y sus parámetros de regularización para evitar las singularidades asociadas al esfuerzo de fluencia inicial, así como la metodología para el desarrollo de una herramienta computacional para estudiar flujos de Herschel-Bulkley confinados, muy comunes en la industria.

En conclusión, debido a que el programa computarizado COMSOL Multiphysics que se utilizó para realizar el estudio usa la ecuación regularizada de Herschel-Bulkley-Papanastasiou para modelar el comportamiento de flujo esta investigación nos permitió como utilizar e interpretar las variables de la ecuación y que rango de valores debía se debían probar para determinar el parámetro de regularización (m) correcto.

2.2 Bases Teóricas

2.2.1 Fluido Viscoelástico

Existen materiales que exhiben un comportamiento intermedio entre sólido y líquido, en donde la viscosidad no alcanza a caracterizarlos (La masa de galletas es un

buen ejemplo), es decir, un material sólido puede describirse por su elasticidad o resistencia (obedece la ley de Hooke, cuando se deforma, almacenará la energía y luchará por recuperar su estado inicial). Ahora, un fluido no almacena energía mientras se está deformando y simplemente fluye al ritmo que le permite su viscosidad (obedece la ley de viscosidad de Newton).

Un material viscoelástico es intermedio y al deformarse fluye almacenando un poco de energía. Esto, debido a poseer una estructura interna que es capaz de almacenar energía a bajas deformaciones, energía que libera luego al cesar la deformación para volver a su configuración original, de manera similar a un resorte. Y, si la deformación es de magnitud suficiente, la estructura interna colapsa y se produce el flujo del material.

2.2.2 Fluidos de Perforación

Especializados y creados para la perforación de pozos petroleros, el fluido de perforación o lodo como comúnmente se le llama, puede ser cualquier sustancia o mezcla de sustancias con características físicas y químicas específicas. Según la data histórica, el primer pozo perforado con lodo fue el Spindletop en Texas en 1901, en el cual el lodo era solo agua y tierra. Posteriormente, alrededor de 1913, se introducen con el propósito de controlar la presión del subsuelo los primeros lodos de agua con arcilla. En consecuencia, surgen las primeras literaturas sobre lodo de perforación en 1914 y 1916 las cuales lo describen como “una mezcla de agua con cualquier material de arcilla que permanecerá suspendido en agua durante un tiempo considerable”.

Décadas de mejoras han dejado un fluido muy diferente de una mezcla de agua y arcilla. Los lodos modernos son compuestos complejos que poseen una fase continua compuesta por líquido y una fase discontinua compuesta por sólidos de una gran variedad que se han diseñado cuidadosamente para controlar factores como: presiones del subsuelo, minimizar el daño de la formación, minimizar la posibilidad de pérdida

de circulación, controlar la erosión del pozo y optimizar los parámetros de perforación, tales como la velocidad de penetración y la limpieza del pozo.

2.2.3 Funcionamiento de los Fluidos de Perforación

El propósito fundamental del fluido de perforación es ayudar a hacer rápida y segura la perforación del pozo, mediante el cumplimiento de las siguientes funciones:

- Control de las presiones de formación: la columna de fluido en el pozo ejerce una presión hidrostática que está en función de la densidad del lodo y la altura vertical del pozo. Esta se usa para controlar la estabilidad del pozo al compensar los incrementos de la presión de formación que, de lo contrario, producirían el ingreso de los fluidos de formación en el pozo, causando posiblemente la pérdida de control del pozo. Sin embargo, la presión ejercida por el fluido de perforación no debe exceder la presión de fractura de la roca propiamente dicha; de lo contrario, el lodo fluiría hacia la formación; situación que se conoce como pérdida de circulación.
- Formar revoque: para minimizar los problemas de derrumbe y atascamiento de tubería en formaciones permeables, es necesario cubrir la pared del hoyo con un revoque liso, delgado, flexible, de baja permeabilidad y altamente compresible. El revoque se logra incrementando la concentración y dispersión de los sólidos arcillosos.
- Capacidad de suspensión: la resistencia o fuerza de gel es la propiedad reológica del fluido que permite mantener en suspensión las partículas sólidas cuando se interrumpe la circulación. Esta propiedad retarda la caída de los sólidos, pero no la evita.
- Remoción de los recortes del pozo: cuando circula el lodo permite llevar los recortes (fragmentos de rocas generados por la barrena) desde el fondo hasta la superficie y la característica que le permite realizar esto es la “Capacidad de Transporte”, clave para la eficiencia de la perforación y la minimización del

potencial para el atascamiento de la tubería. Está depende de la densidad, viscosidad y el punto cedente del fluido.

- **Enfriamiento y lubricación de la barrena:** A medida que el fluido de perforación pasa a través y alrededor del arreglo de perforación rotativo, ayuda a enfriar y lubricar la barrena. La energía térmica es transferida al fluido de perforación, que lleva el calor a la superficie. En ambientes de perforación extremadamente calientes, pueden utilizarse intercambiadores para enfriar el lodo.
- **Transmisión de la energía hidráulica a la barrena y las herramientas de fondo de pozo:** Al lodo ser descargado a través de las boquillas de la barrena. La energía hidráulica liberada contra la formación ablanda y eleva los recortes lejos de la formación. Además, esta energía acciona los motores de fondo y otros equipos que direccionan la barrena y obtienen datos de perforación o de la formación en tiempo real.

2.2.4 Ciclo de Vida del Fluido de Perforación

Williamson D. (2013) reseña que el diseño y mantenimiento de los fluidos de perforación “son procesos iterativos afectados por las condiciones de superficie y de fondo de pozo. Estas condiciones cambian a medida que el pozo se perfora a través de formaciones más profundas y se encuentran incrementos graduales de temperatura y presión” (p. 69). Por ende, se debe ajustar el fluido de perforación en respuesta a las condiciones variables de pozo y luego evaluar el rendimiento de los fluidos y modificar sus propiedades en un ciclo continuo.

- **Diseño inicial:** En la fase de planeación, se seleccionan diferentes tipos y diseños de lodo para cada sección del pozo, es decir, la perforación puede comenzar con un sistema de fluidos simples y a medida que el pozo se profundiza, el incremento de la presión de formación, el aumento de la temperatura y la presencia de formaciones más complejas requieren niveles más altos de control mecánico y capacidad de limpieza del pozo. Los sistemas de

fluidos simples pueden ser desplazados o convertidos en un lodo inhibidor espesado, a base de agua, seguido por fluidos de perforación no acuosos a mayores profundidades.

- **Circulación:** el fluido consume energía, levanta los recortes, enfría la barrena y el pozo, y luego descarga los residuos en la superficie. Esto exige que se evalúen y recarguen continuamente el sistema con fluidos nuevos y otros aditivos.
- **Medición y rediseño:** Consiste en monitorear constantemente las condiciones del pozo y las características del fluido de retorno, para efectuar en el lodo los ajustes que imponen las condiciones de pozo y de perforación.

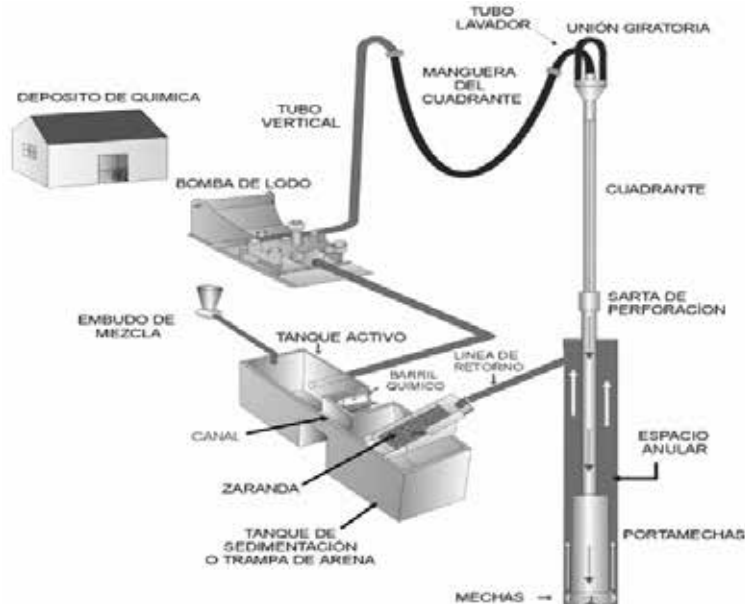


Figura 1. Ciclo del lodo de perforación y sus partes

Fuente: Ortega A., Molero J., Rivas A. y Sánchez V. (2002). Fluidos de Perforación PDVSA

Ahora bien, como se puede apreciar en la figura 1, el ciclo de vida o trabajo del fluido de perforación de manera general consta de 7 etapas primordiales a la hora de iniciar desde cero las cuales son:

- 1°. **Etapas:** inicia desde del embudo de mezcla ya que aquí es donde se le añaden todos sus componentes hasta que se obtiene el fluido de perforación deseado

inmediatamente mientras se va mezclando el mismo va pasando hacia la siguiente etapa del ciclo

- 2°. Etapa: en esta el fluido de perforación es depositado en el tanque activo, donde este se mantendrá estático, esperando a que sea accionada la bomba triplex para pasar a la siguiente etapa.
- 3°. Etapa: a partir de aquí el fluido de perforación es succionado por la bomba y a su vez descargado hacia la siguiente etapa, aquí su presión es elevada de 45 Psi hasta 3000 Psi aproximadamente, dependiendo del modelo de bomba triplex que este instalada en el sistema de bombeo del pozo.
- 4°. Etapa: el fluido de perforación con alta presión pasa a través del tubo vertical hacia la maguera del cuadrante la cual va conectada a la unión giratoria del perforador, en la entrada de ducha unión se encuentra un tubo lavador para proteger el sistema de alguna impureza que pueda haber llegado hasta este punto.
- 5°. Etapa: este es el momento en el que el fluido de perforación es introducido a través de la sarta de perforación, pasando por la portamechas hasta llegar a la punta del taladro donde empieza a cumplir con su función tanto de refrigerante de las mechas como estabilizador del pozo.
- 6°. Etapa: una vez que el fluido a llegando a este punto empieza un recorrido por el espacio anular del pozo, debido a las altas presiones este empieza a subir, aprovechando de esta forma estabilizar la totalidad del pozo y al mismo tiempo extraer todo sedimentos desprendidos durante la perforación.
- 7°. Etapa: al llegar el fluido a esta etapa, la cual inicia en la línea de retorno, empieza el proceso de recirculación en el ciclo, pero no antes de pasar por un sistema de filtrado y saneamiento en la zaranda para separar lo que es sedimento del pozo y el fluido de perforación que aún conserva sus propiedades, luego de esto es enviado por una interconexión que existe entre el tanque activo y el

tanque de sedimentación que posee una trampa de arena , dicha conexión se denomina canal, para luego de esto iniciar nuevamente el ciclo desde el tanque activo.

2.2.5 Tipos de Fluidos de Perforación

En la selección de un lodo se debe tomar en cuenta factores como el costo, tiempo de taladro, problemas en el pozo, daño a la formación, productividad o impacto ambiental. Según estos parámetros se usan distintos tipos de lodo que se clasifican según cual es la fase continua presente en él, influyendo en su composición si la fase continua es líquida, gaseosa o una mezcla de ambas.

2.2.5.1 Base Agua

Son aquellos cuya fase líquida o continua es agua (dulce o de mar). Estos sistemas son muy versátiles y se utilizan por lo general para perforar formaciones no reactivas y de baja presión, sean productoras o no productoras de hidrocarburos y se clasifican en emulsiones, dispersos y no dispersos, de acuerdo al efecto que tienen sobre los sólidos perforados y sobre las arcillas agregadas.

Fluidos Dispersos: contienen adelgazantes químicos

Fluidos No Dispersos: no contienen adelgazantes químicos. En este caso, las arcillas agregadas o incorporadas encuentran su propia condición de equilibrio de una forma natural.

Los fluidos dispersos y los no dispersos a su vez, pueden estar o no inhibidos. El término no inhibido se refiere a la ausencia total de iones inhibidores de lutitas, como: potasio, calcio o sodio. En cambio, un fluido tiene propiedades inhibitorias cuando contiene cationes o agentes encapsulantes en cantidades suficientes, por tal razón los fluidos inhibitorios de base acuosa reducen o inhiben la interacción entre el fluido y las arcillas de formación.

2.2.5.2 Base Aceite

Los fluidos base aceite son aquellos cuya fase continua es aceite puro. Pueden ser del tipo de emulsión inversa o cien por ciento (100%) aceite y se justifica principalmente para perforar formaciones lutíticas sensibles al agua (formaciones reactivas), pozos profundos con altas temperaturas, zonas productoras de gases ácidos (H₂S/CO₂), zonas de bajo gradiente, domos de sal y pozos direccionales. Estos fluidos se preparan sin agua, pero con un emulsificante débil que tiene la habilidad de absorber el agua de la formación y emulsionarla de una manera efectiva en el fluido.

Lodos 100% Aceite: Diseñados originalmente para recuperar núcleos en su estado original, sin alteración. Estos fluidos se preparan sin agua, pero con un emulsificante débil que tiene la habilidad de absorber el agua de la formación y emulsionarla de una manera efectiva en el fluido.

- 100% Aceite Mineral: En presencia de agua de formación, estos fluidos originan una emulsión que evita el contacto del agua con las formaciones reactivas. Debido a la falta de reacción entre el fluido y la formación se puede permitir la incorporación de grandes cantidades de sólidos sin afectar mayormente al sistema. se caracterizan por dar alta lubricidad lo que disminuye considerablemente los problemas de torque y arrastre que se obtienen al maniobrar las sartas de perforación.
- 100% Aceite Sintético: implementados como reemplazo de los sistemas base aceite mineral, con la intención de reducir el impacto sobre el medio ambiente en áreas sensibles, tanto en tierra como costa afuera.

2.2.6 Fluidos de Perforación Viscoelásticos

Existen pozos petroleros en donde para mejorar la obtención de hidrocarburos del yacimiento, la perforación es direccional (se realiza con altos grados de inclinación con respecto a la vertical o de forma horizontal). Aquí es donde se utilizan los fluidos viscoelásticos de perforación, debido a su gran capacidad de limpieza y de suspensión.

Estos fluidos son utilizados en perforaciones por los beneficios y ventajas de las cuales gozan, algunos de estos beneficios son:

Altas viscosidades a bajas tasas de corte (LSRV); altos geles instantáneos, frágiles y de fácil ruptura; bajas resistencias al flujo con mínima presión de bomba; minimiza los problemas de arrastre; una gran capacidad de limpieza y suspensión; mayores tasas tanto de flujo como de penetración; mínimos problemas de arrastre; buenas condiciones hidráulicas en la mecha y mínimas pérdidas de presión en flujo turbulento que resulta ser a menudo el perfil óptimo, para eliminar sólidos cuando se perforan pozos horizontales

Además, los fluidos viscoelásticos se caracterizan por exhibir un esfuerzo verdadero de cedencia elevado, que indica la transición del estado casi sólido al estado casi líquido bajo condiciones de corte mínimo.

2.2.7 Sistema Viscoelástico

2.2.7.1 Componentes de los sistemas viscoelásticos

Un fluido perforación viscoelástico no es más que un sistema conformado por una variedad de sustancias que le dan las propiedades deseadas, estos son:

- **Agua fresca:** Es la fase continua del sistema viscoelástico, puede ser agua dulce o salmuera esto depende de la disponibilidad del líquido. Es usada como base del fluido y es ideal para perforar formaciones duras, compactas y de bajas presiones.
- **Biopolímero:** es el componente que otorga el comportamiento viscoelástico, actúa como viscosificante y da la capacidad de suspensión del sistema, el más común es la goma xántica.
- **Almidón:** Se usa como controlador de filtrado, provee un mínimo de viscosidad y aumenta la estabilidad del pozo.
- **Inhibidor y controlador del pH:** Se emplea para incrementar el pH en el sistema, además que ayuda a la inhibición de las lutitas.

- **Lubricante de baja toxicidad:** Es un lubricante usado para disminuir el coeficiente de fricción.
- **Bactericidas:** Es un componente que se emplea para controlar la proliferación bacteriana en el fluido.
- **Densificante:** Aumenta la densidad del lodo ayuda a evitar la invasión de fluidos externos desde la formación al pozo y al mismo tiempo ayuda a prevenir la pérdida de circulación, generalmente se utiliza el Carbonato de calcio.

2.2.8 Reología de los Fluidos de Perforación

Los fluidos de perforación que proporcionan son no newtonianos y exhiben comportamientos que son descriptos por modelos matemáticos reológicos de esfuerzo cortante, o resistencia, como una función de la velocidad de corte, estos modelos son los siguientes:

2.2.8.1 La ley de la Potencia

Describe un fluido en el cual el esfuerzo de corte graficado en función de la tasa de corte es una línea recta, cuando se utiliza papel de coordenadas doblemente logarítmicas. Debido a que se aproxima más al comportamiento de un fluido de perforación a bajas tasas de corte, en comparación con el modelo plástico de Bingham, con frecuencia se emplea para monitorear las características de suspensión y calcular la pérdida de presión del fluido de perforación en el anular. El modelo de la ley exponencial es:

$$\tau = k\gamma$$

2.2.8.2 Modelo de Herschel-Bulkley

En este modelo se generalizan las ecuaciones de los fluidos no newtonianos (incluyendo la ley de la potencia), aquí la tensión experimentada por el fluido se relaciona con la deformación de una manera complicada y no lineal, además de que se agrega un esfuerzo de fluencia τ_0 , que es el valor mínimo que se le debe aplicar al fluido para que empiece a fluir.

$$\tau = \tau_0 + k\gamma^n \quad (3)$$

Donde:

τ : es el esfuerzo cortante (Pa)

τ_0 : es el estrés de rendimiento (Pa)

γ : es la tasa de corte ($1/s$)

k : índice de consistencia del fluido (Pa. s)

n : índice de comportamiento de flujo

2.2.8.3 Modelo de Herschel-Bulkley-Papanastasiou

Antes de explicar este modelo se debe aclarar en que consiste el modelo de Papanastasiou, y este es un modelo que busca solventar la limitación debida a la singularidad de la viscosidad para $\gamma = 0$, proponiendo una regularización exponencial para el término de la tensión de fluencia del modelo de Herschel-Bulkley; La ventaja que presenta este modelo es que describe con una sola ecuación tanto las zonas de fluencia como las de no fluencia, la ecuación de este modelo es:

$$\mu(\gamma) = \frac{\tau_y}{\gamma} [1 - \exp(-m\gamma)] + k(\gamma)^{n-1} \quad (4)$$

Donde:

$\mu(\gamma)$: viscosidad aparente (Pa. s)

m : parámetro de regularización (s)

2.2.9 Régimen de Flujo de los Fluidos de Perforación

Los regímenes encontrados en los fluidos de perforación son laminar, turbulento, y deslizante (Flujo de Stokes). En un flujo laminar, es cuando el fluido se comporta como una serie de láminas de flujos paralelas una con respecto de las otra, capas que se mueven a velocidad uniforme o casi uniforme. El flujo turbulento se caracteriza por la velocidad, fluctuaciones entre las partículas de la corriente de fluido, tanto paralelas como axiales a las del flujo medio. Estas fluctuaciones rompen los límites entre las capas fluidas, lo que resulta en un patrón de flujo caótico y el deslizante es un tipo de flujo de fluido donde las fuerzas advectivas inerciales son pequeñas comparadas con las fuerzas viscosas, hasta el punto de ser despreciables.

Por lo general, se prefiere ver el flujo laminar en el anillo para mover los cortes por el orificio y evitar la erosión. El flujo turbulento, por otro lado, es más deseable en el fondo del agujero porque promueve la limpieza y la eliminación de los recortes. Si bien son conceptualmente fáciles de visualizar, los regímenes de flujo pueden ser difíciles de identificar.

La forma para identificar el tipo de régimen de flujo de manera analítica es el valor del número de Reynolds, lo que nos lleva a que el cálculo de este varía dependiendo del tipo de fluido que se esté estudiando. En el caso del modelo de Herschel-Bulkley se debe calcular un número de Reynolds crítico” (Re_{cri}) y compararlo con el número de Reynolds (N_{Re}) del flujo en ese momento, con esta consideración se puede determinar:

$$\begin{aligned} N_{Re} < 1 & \quad \text{Regimen Deslizante} \\ N_{Re} < Re_{cri} & \quad \text{Regimen Laminar} \\ N_{Re} > Re_{cri} & \quad \text{Regimen Turbulento} \end{aligned}$$

2.2.10 Bomba recíproca

En el manual de Schlumberger Bombas Triplex (s/f) se define como un “Aparato mecánico compuesto por diversos elementos de desplazamiento positivo de acción

simple: tales como los pistones o los émbolos, que se utiliza para transmitir un flujo pulsante a un fluido” (p. 4)

2.2.11 Bomba Triplex

Son bombas que llevan tres pistones, y son de simple acción, es decir desplazan el fluido en un solo sentido (en su carrera de descarga y no en la de succión). Este tipo de bomba queda definido por diámetro y longitud de la camisa. En cada cilindro el fluido se descarga por el movimiento de empuje del pistón dejando el espacio detrás vacío. Cuando el pistón retorna se vuelve a llenar de fluido la única cámara que será vaciada al moverse el pistón nuevamente hacia delante.

2.2.12 Componentes Principales

El funcionamiento de la bomba triplex y sus partes se dividen en dos secciones, una mecánica en donde se encuentra el accionamiento de la bomba y otra hidráulica, encargada del desplazamiento del fluido (ver figura 4).

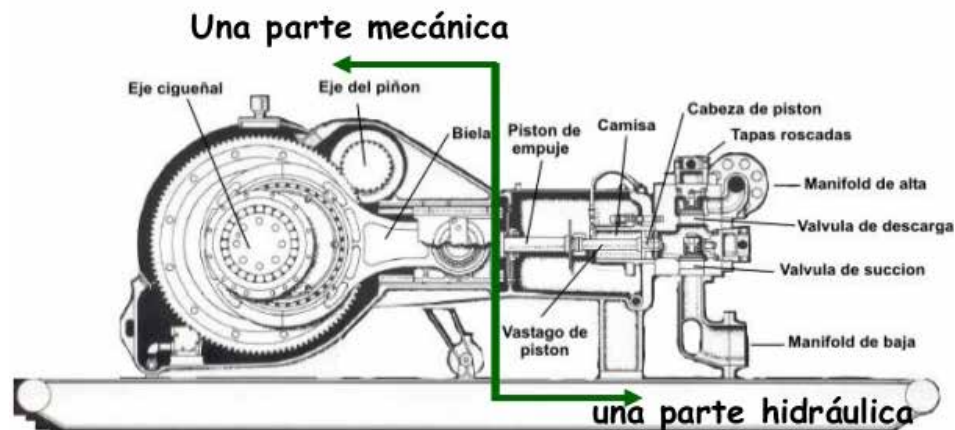


Figura 2. Componentes principales Bomba triplex

Fuente: Pride (S/F). Curso de Bombas de lodo.

2.2.12.1 Sección Mecánica

Caja de cadena, (también llamada reductor de velocidad): reduce la velocidad de rotación (rpm) del eje de entrada. Esta posee dos importantes funciones:

- 1) Ofrece flexibilidad, permitiendo montar la bomba en distintas posiciones con respecto al eje de salida del motor primario. La caja de cadena puede ir montada en cualquiera de los lados del power End.
- 2) Convierte la salida del motor de bajo torque y alta velocidad de rotación en alto torque y baja velocidad de rotación, más adecuado a los requisitos del power End.

El motor primario hace que la cadena se desplace sobre las ruedas dentadas superior e inferior, montadas en el eje de piñón de la bomba. Al girar el eje inferior, la cadena transmite la potencia al eje superior, haciéndolo que gire también. Este eje transmite entonces la rotación al eje de piñón del power end. Debido a la diferencia en diámetros de las dos ruedas dentadas de la caja de cadena, la velocidad de salida del motor primario se reduce y se incrementa el torque transmitido a la bomba (ver figura 5).



Figura 3. Caja reductora

Fuente: Schlumberger. JET Modulo 2 Bombas Triplex.

Power End: convierte la energía de rotación en energía de movimiento alternativo. Funciona igual que el cigüeñal del motor de un automóvil, el eje del piñón mueve el cigüeñal mediante los engranajes principales. Las excéntricas del cigüeñal transforman

la rotación del eje principal en un movimiento alternativo. La fuerza alternativa se transmite entonces a las bielas y las crucetas, desplazando los pistones que se encuentran en el fluid End (ver figura 6 y 7).

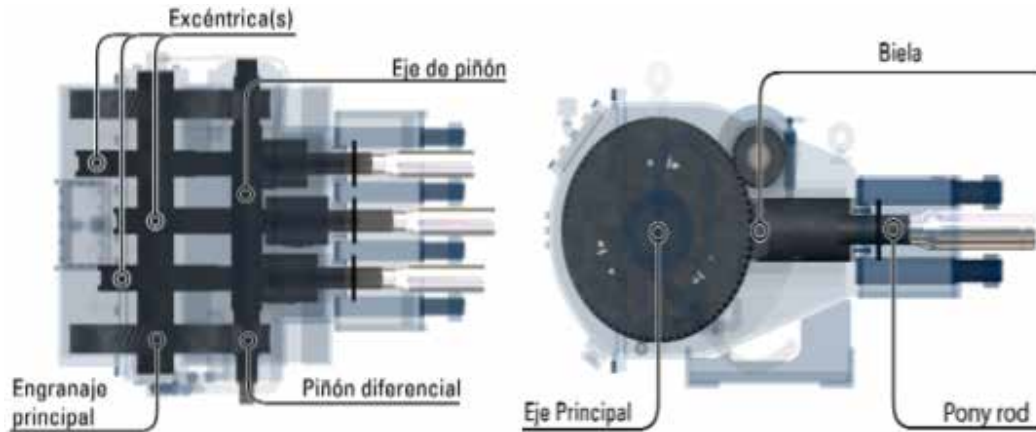


Figura 4. Power end

Fuente: Schlumberger. JET Modulo 2 Bombas Triplex.



Figura 5. Power End (vista isométrica)

Fuente: Schlumberger. JET Modulo 2 Bombas Triplex.

El power End, a su vez está constituido por una serie de elementos mecánicos que poseen funciones definidas como las bielas, cabezas de bielas, vástago de empuje, eje o cigüeñal y el vástago del pistón. Aquí, las bielas van con pernos unidas a las

cabezas de bielas, que deslizan sobre zapatas de bronce, y en esas cabezas va fijado el vástago de empuje. A este vástago se unen los vástagos de pistón.

- Eje Cigüeñal: es un eje acodado, con codos y contrapesos (conocido por los motores de los automóviles convencionales), cuyo principio es el mecanismo de biela-manivela, donde transforma el movimiento rectilíneo alternativo en circular uniforme y viceversa. Se encuentra conformado con los siguientes elementos: Muñones de bancada, muñones de biela, manivela, contrapesos, extremos de la caja de distribución y del amortiguador de vibraciones, extremo del volante de inercia y conductos de lubricación como se puede apreciar en la figura 8.
- Biela: es la varilla, articulada por un extremo con el pistón y por el otro con la muñequilla del cigüeñal, que permite la transformación del movimiento alternativo en rotativo. Sus partes constitutivas se muestran en la figura 9.

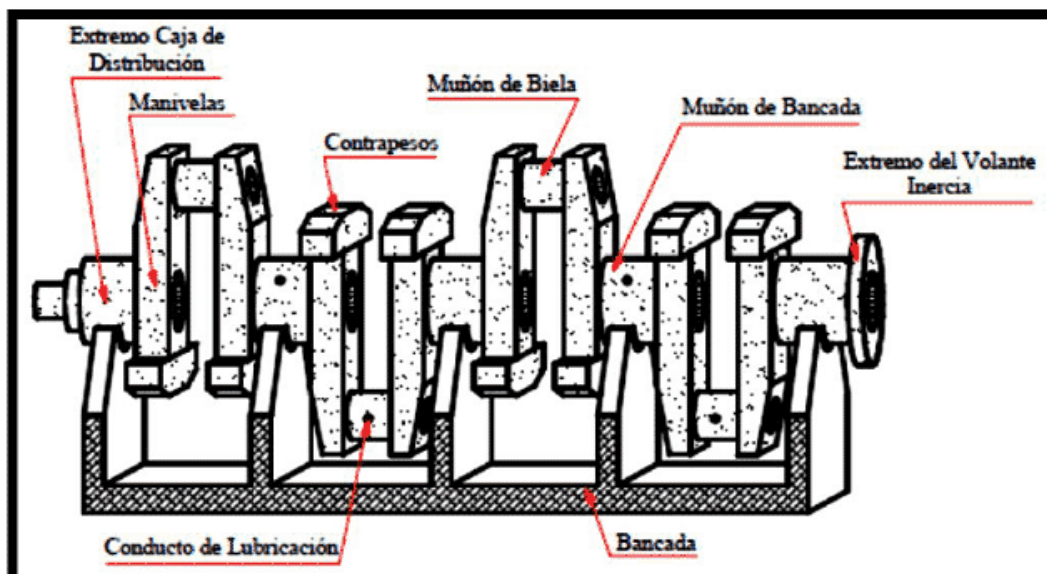


Figura 6. Componentes del Cigüeñal

Fuente: Valladares S. (2018) Cigüeñal, Qué Es, Cómo Funciona, Partes, Dónde Se Ubica Y Por Qué falla.

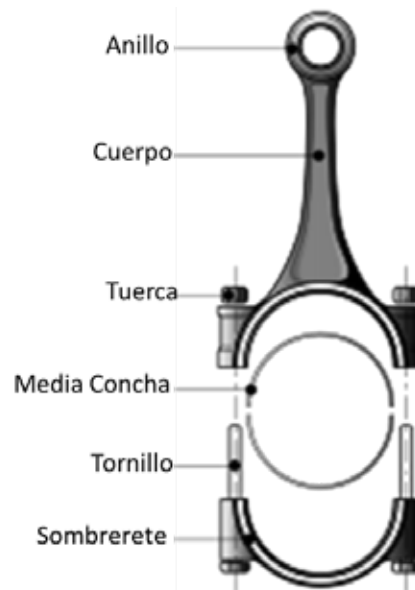


Figura 7. Partes de una Biela

Fuente: Valladares S. (2018) Cigüeñal, Qué Es, Cómo Funciona, Partes, Dónde Se Ubica Y Por Qué falla.

2.2.12.2 Sección Hidráulica

Fluid End: recibe la energía del Power End, se encarga de recibir el fluido a baja presión, transmitir la potencia al fluido y provocar la descarga a alta presión. La acción de bombeo mecánico se puede ver de manera análoga a un motor reciprocante convencional de combustión interna o un compresor de aire de pistón reciprocante. Cuando el pistón se mueve hacia el Power End durante la carrera de succión, la presión que hay en el interior de la cámara disminuye, entre las válvulas de succión y de descarga. Eso hace que la válvula de succión se levante y permita la circulación de fluido en el manifold de succión a través de la entrada de succión, alrededor de las válvulas de succión y en el interior de la cámara.

Cuando el pistón se desplaza en sentido opuesto (carrera de descarga), el fluido que hay dentro de la cámara es expulsado hacia el exterior. La válvula de succión se cierra inmediatamente y el fluido levanta de su asiento la válvula de descarga, empujando el fluido hacia la cámara de descarga.

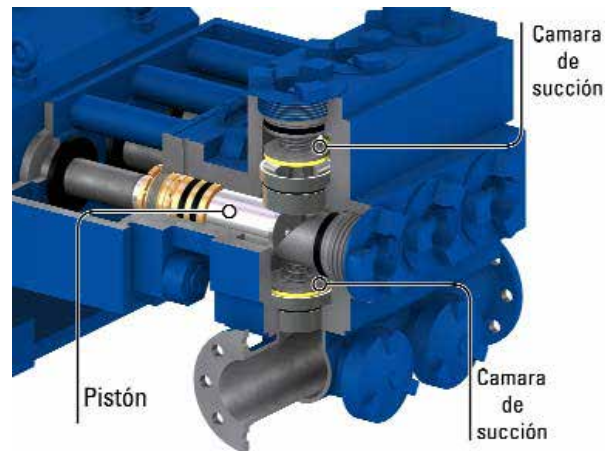


Figura 8. Fluid End

Fuente: Schlumberger. (S/F) JET Modulo 2 Bombas Triplex.

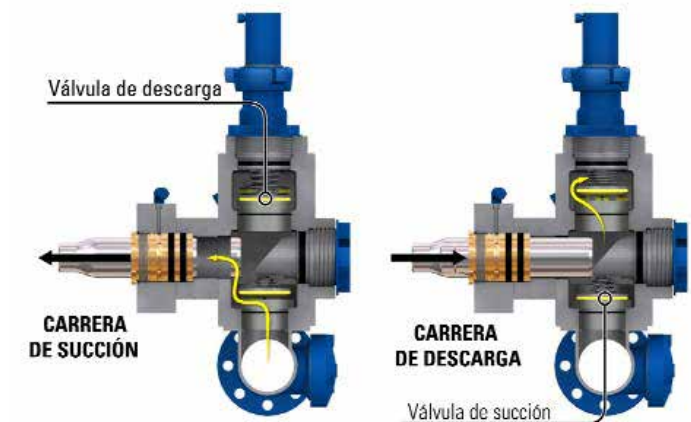


Figura 9. Flujo a través del Fluid End

Fuente: Schlumberger. (S/F) JET Modulo 2 Bombas Triplex

Como se puede apreciar el “Fluid End”, ilustrado en la (Figura 4) como parte hidráulica es la sección encargada de hacer la labor de la bomba, es decir, desplazar y aumentar la presión del fluido. El Fluid End está compuesto por los siguientes elementos:

- Cuerpo Hidráulico: es un cuerpo de acero que contiene en su interior y exterior partes maquinadas, para el alojamiento de: asiento de válvula, guía de válvula, anillo empaquetador de los manifold, de alta (descarga) y de baja (succión). En

su parte exterior tiene bridas abulonadas en los cuales se insertan las tapas roscadas.

- Bridas roscadas y Tapas: estos son cuerpos maquinados con roscas en el interior los cuales son llamados “bridas” y en el exterior “tapas”
- Válvulas: estas válvulas (de succión y descarga) tiene como función permitir la entrada del fluido hacia el cuerpo hidráulico y camisas donde la compresión de la etapa posterior permite la apertura de la válvula de descarga para ser enviado al pozo a través de la línea de superficie.
- Asientos de Válvulas: estos tienen una conicidad en el interior semejante al de la válvula, lo que permite un sello total cuando esto se requiere. En la parte exterior, el maquinado permite que el asiento sea “clavado” al cuerpo hidráulico logrando así un ajuste perfecto.
- Guías de Válvulas: tienen como función mantener las válvulas (succión y descarga) en la posición correcta durante la apertura o cierre, llegan a cerrar o abrir más de 100 veces por minuto.
- Vástago de empuje: se encuentra unido a la biela, transmite el movimiento del motor de la bomba ya sea eléctrico o mecánico (diésel), al vástago de pistón. Este movimiento posee una trayectoria lineal permitiendo al desplazarse en ambas direcciones producir la succión del fluido y luego al hacerlo en sentido contrario realiza el pistón la impulsión del fluido o descarga.
- Vástago de pistón: se encuentra conformado por dos elementos; “Cabeza de pistón” y el “Inserto del pistón”. Ahora bien, la cabeza de pistón va ajustada al vástago del pistón por medio de una tuerca y un o ‘ring. Los pistones trabajan dentro de camisas cuyo largo es coincidente con el recorrido del pistón, y sus diámetros varían según los caudales y presiones con los que se vaya a operar. Se Sellan contra el cuerpo hidráulico por medio de una empaquetadura, que es variable dependiendo del tipo de bomba y el diámetro.

- Grampas de unión: permite la unión de los vástagos de empuje y los vástagos de pistón. Son dos cuerpos partidos que se unen con sus correspondientes tornillos.
- Camisas: los pistones se mueven en el interior de las camisas; pudiendo variar el diámetro, solamente de las camisas variara indefectiblemente el máximo caudal. Al variar el diámetro también variara la máxima presión y a menor diámetro mayor presión, una empacadura sella la unión de la camisa y el cuerpo y esta se fija con una brida y bulones.
- Manifold: es la disposición de válvulas y tuberías que permite varias alternativas durante el proceso de succión y descarga de fluidos entre dos o más bombas.

2.2.13 Comportamiento hidráulico de la bomba

En las bombas de pistón hay un movimiento alternativo y desde el punto de vista cinemático sigue las leyes del mecanismo biela manivela, con velocidad y aceleración variable a lo largo de la carrera. La velocidad instantánea es cero en los puntos muertos siendo máxima a la mitad de la carrera, siguiendo una función senoidal a lo largo de la misma. La aceleración es máxima en la cercanía de los puntos muertos y cero a mitad de la carrera.

Así como la velocidad del pistón sigue una función senoidal a lo largo de la carrera, lo mismo ocurre con el caudal pues el área del cilindro es constante. Como la presión en la tubería de descarga es función del caudal, ella también sigue una función senoidal, por lo que en definitiva la velocidad, caudal y presión son pulsantes. El razonamiento vale para un solo cilindro de simple efecto. Para que estas pulsaciones no se traduzcan en golpes hidráulicos severos y cavitación, la condición esencial es que el frente de la masa de fluida que ingresa al cilindro no se separe de la cara frontal del pistón, cosa que puede ocurrir por alguno de los motivos:

- **Inercia del Fluido:** el fluido debe acelerarse cuanto menos igual que el pistón.

- **Cavitación:** cuando la presión en la succión de la bomba es menor que la presión de vapor del fluido (o del agua contenida en el mismo, la que sea mayor) a la temperatura de trabajo.

2.2.14 Cálculo de Caudal de Bombeo

$$Caudal\ de\ bombeo_{bpm} = (bbl/rev)_{\text{árbol principal}} \cdot rpm_{\text{árbol principal}} \quad (6)$$

$$rpm_{\text{árbol principal}} = \frac{Motor(rpm)}{(Relacion\ Power\ end\ Relacion\ transmisión)} \quad (7)$$

2.2.15 Dinámica Computacional de Fluidos (CFD).

El flujo y sus diferentes fenómenos se pueden describir por ecuaciones diferenciales parciales, las cuales no pueden ser resueltas por procesos analíticos. Para lograr obtener una aproximación a la solución numérica se deben utilizar métodos de discretización que aproxime las ecuaciones diferenciales a un sistema de ecuaciones algebraicas, las cuales pueden ser resueltas por una computadora. La dinámica de fluidos computacional o CFD utiliza la discretización y los distintos métodos numéricos para resolver y analizar problemas de flujo en tres dimensiones y situaciones poco comunes o en las cuales simplemente no existe un software específico para el caso.

Existen diferentes ventajas en la utilización de CFD en lugar de las pruebas tradicionales, la principal y más evidente es la falta del modelo o prototipo, el cual es necesario para la realización de experimentos, pero no lo es para una simulación numérica, otra ventaja de usar estos métodos computacionales es la colocación de las condiciones de contorno, como la temperatura del fluido, las cuales son fáciles de especificar en una simulación, pero difícil de controlar en una prueba experimental. Sin embargo, la precisión de los resultados y por lo tanto todas estas ventajas dependen de la capacidad del software CFD de resolver las ecuaciones de Navier-Stokes con precisión, lo cual, para un número de Reynolds elevado resulta bastante difícil.

Cuando las ecuaciones que gobiernan al fluido son conocidas y precisas, la solución a cualquier problema puede ser alcanzado utilizando la herramienta de CFD, sin embargo, para muchos fenómenos como la turbulencia, combustión y fluidos con múltiples fases las ecuaciones exactas o no están disponibles o su solución numérica no es factible. Esto hace que sea necesaria la introducción de modelos, e incluso con estos modelos y ecuaciones exactas, los resultados pueden no ser representativos de la realidad, por lo tanto, para validar estos modelos se deben observar datos experimentales.

2.2.16 Componentes de un CFD

- **Modelos matemáticos.**

El punto de inicio de cualquier método numérico es el modelo matemático. Al simular se escoge un modelo aproximado para la aplicación necesaria, ya sea fluido incompresible, turbulento, en dos o tres dimensiones, etc. Estos métodos están usualmente diseñados para un conjunto particular de ecuaciones, ya que tratar de encontrar un modelo o método general son imposibles o muy poco optimizados para ser aplicados.

- **Método de discretización.**

Después de la selección del modelo matemático, se debe escoger un buen método de discretización, existen muchas aproximaciones, pero los más importantes son: diferencias finitas, volumen y elementos finitos. Cada elemento muestra la misma solución si el mallado es muy fino, sin embargo, algunos métodos son más aplicables a algunos casos. La escogencia del método esta normalmente determinada por el desarrollador.

- **Sistema de coordenadas.**

El sistema de coordenadas incluye directamente en las formas de escribir las ecuaciones de conservación. La selección del sistema de coordenadas depende

normalmente de flujo destino y puede influenciar el método de discretización y el tipo de mallado para ser utilizado.

- **Mallado numérico.**

Las localizaciones discretas en las cuales las variables serán calculadas están definidas por un mallado numérico que es, esencialmente, una representación discreta del dominio geométrico en el cual el problema será resuelto. Divide el dominio de la solución en un número finito de subdominios, elementos, volúmenes de control, etc. Algunas de las opciones disponibles para esto son las siguientes:

Mallado estructurado regular: el mallado estructural consiste en familias de líneas de mallas que tienen la propiedad de que estas líneas no miembros de su misma familia y solo cruzan un miembro de las otras familias una sola vez.

Esta es la estructura más simple, ya que es lógicamente equivalente a un mallado cartesiano, todo punto puede ser representado por un conjunto de dos coordenadas en el caso de mallado en 2 dimensiones (ver figura 12) y un conjunto de tres puntos para el caso de 3 dimensiones. Cada punto en el mallado posee vecinos cercanos en los cuales tiene una diferencia en uno de sus índices de 1, esta conexión entre los puntos del mallado simplifica muchísimo la programación y la matriz de sistema de ecuaciones algebraicas tiene una estructura regular, la cual puede ser utilizada para desarrollar una técnica o algoritmo de solución más simple.

La desventaja de este mallado estructural, es que solo se puede utilizar para dominios geoméricamente simples. Otra desventaja es que puede resultar difícil controlar la distribución de los puntos del mallado, la concentración de puntos en una región para aumentar la precisión se producirá un espaciado innecesariamente pequeño en otras partes del dominio en las cuales no se requiere esta precisión.

Existen tres tipos de mallados estructurales, los tipos, H, O, o C, los nombres provienen de la forma de las líneas del mallado.

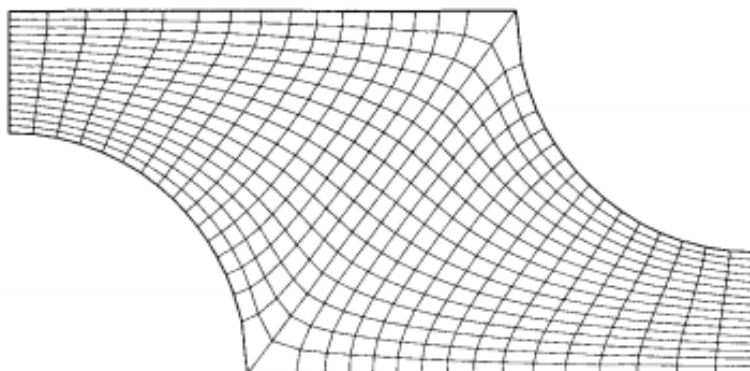


Figura 10. Ejemplo de un mallado 2D, estructurado, no ortogonal.
Fuente: Joel H. Ferziger y Milovan Peric. (2002) Computational methods for Fluid Dynamics.

Mallado estructurado en bloques: en el mallado estructurado en bloques existen dos o más niveles de subdivisión del dominio de la solución. En el nivel grueso, están los bloques que son segmentos relativamente grandes del dominio, su estructura será irregular y es posible que estén sobrepuestas. En el nivel fino se define un mallado estructural. Un tratamiento especial es necesario en las interfaces de los bloques (ver figura 13).

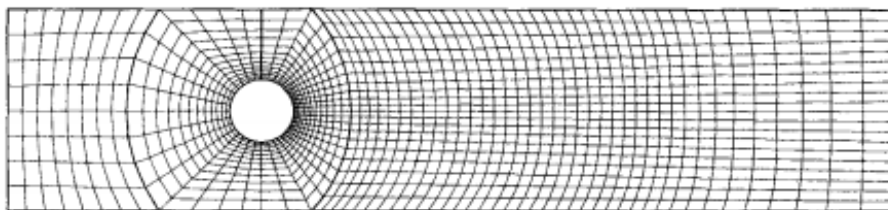


Figura 11. Ejemplo de un mallado 2D estructurado en bloque.
Fuente: Joel H. Ferziger y Milovan Peric. (2002) Computational methods for Fluid Dynamics.

Mallado sin estructura: se utiliza para geometrías complejas, es el tipo de mallado más flexible y puede adaptarse a dominios arbitrarios y límites. En principio estos arreglos pueden ser utilizados en cualquier esquema de discretización, pero se adaptan mejor para los métodos de volumen y elementos finitos. Los elementos o volúmenes de control pueden tener cualquier forma. En la práctica, los mallados hechos de triángulos o cuadriláteros en 2D, y tetraedros o hexaedros en 3D son los más

utilizados. Estos mallados pueden ser generados de manera automática por algunos algoritmos (ver figura14).

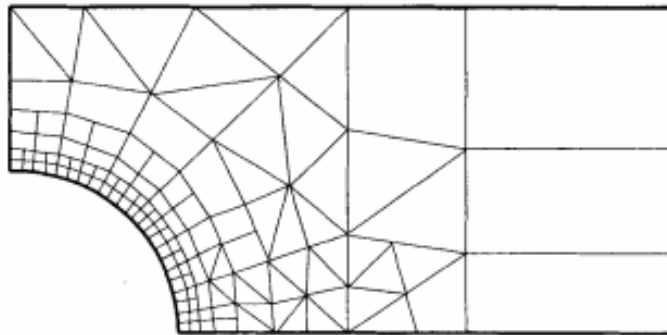


Figura 12. Ejemplo de un mallado sin estructura 2D.

Fuente: Joel H. Ferziger y Milovan Peric. (2002) Computational methods for Fluid Dynamics.

· **Aproximaciones finitas.**

Luego de la selección de tipo de mallado se debe seleccionar las aproximaciones para utilizar en el proceso de discretización. En un método de diferencias finitas, se debe seleccionar una aproximación por derivadas en los puntos del mallado. En el método de volúmenes finitos, se deben seleccionar métodos de aproximación por integrales de superficie y volumen. En el método de elementos finitos, se debe seleccionar las funciones del peso y la forma de los elementos del mallado.

Existen muchas posibilidades de las cuales escoger, pero se debe tomar en cuenta que esta decisión afectará la precisión de la aproximación, la dificultad de desarrollar un método de solución, generar su código y la velocidad de corrida de este. Aproximaciones más exactas implican mayor memoria y mayor tiempo de procesamiento, ya que se deben resolver más nodos y más elementos del mallado.

· **Métodos de solución.**

La discretización arroja un gran sistema no lineal de ecuaciones algebraicas. El método de solución a ser aplicado depende del problema que se desea resolver, para flujos inestables se utiliza métodos basados en los que se utilizan para problemas de

ecuaciones diferenciales ordinarias con valores iniciales. Para problemas de flujo estable normalmente se utilizan esquemas de iterancia.

• **Criterio de convergencia.**

Finalmente es necesario colocar un criterio de convergencia para el método iterativo a que es utilizado. Normalmente, hay dos niveles de iteraciones, internas, con los cuales se resuelven ecuaciones lineales, y externas, que trabajan con ecuaciones no lineales. Decidir cuándo detener el proceso de iteración en cada nivel es de vital importancia, tanto para la precisión de los resultados como para la eficiencia del programa.

2.2.17 Ecuaciones de Navier-Stokes.

Las ecuaciones de Navier-Stokes son ecuaciones diferenciales parciales no lineales de segundo orden, no producen soluciones matemáticas exactas, salvo en algunos casos simplificados. Sin embargo, en estos pocos casos en los que las soluciones se obtienen y se comparan con resultados experimentales, los resultados concuerdan bastante. En términos de coordenadas polares cilíndricas, las ecuaciones de Navier-Stokes se pueden escribir como:

Dirección r, se determina a través de la Ecuación 8.

$$\rho \left[\frac{\partial V_r}{\partial t} + V_r \frac{\partial V_r}{\partial r} + \frac{V_\theta}{r} \frac{\partial V_r}{\partial \theta} - \frac{V_\theta^2}{r} + V_z \frac{\partial V_r}{\partial z} \right] = -\frac{\partial P}{\partial r} + \rho g_r + \dots$$

$$\dots u \left[\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial V_r}{\partial r} \right) - \frac{V_r}{r^2} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 V_r}{\partial \theta^2} - \frac{1}{r^2} \frac{\partial V_\theta}{\partial \theta} + \frac{\partial^2 V_r}{\partial z^2} \right] \quad (8)$$

Dirección θ , se determina a través de la Ecuación 9.

$$\rho \left[\frac{\partial V_\theta}{\partial t} + V_r \frac{\partial V_\theta}{\partial r} + \frac{V_\theta}{r} \frac{\partial V_\theta}{\partial \theta} - \frac{V_r V_\theta}{r} + V_z \frac{\partial V_\theta}{\partial z} \right] = -\frac{1}{r} \frac{\partial P}{\partial \theta} + \rho g_\theta + \dots$$

$$\dots u \left[\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial V_\theta}{\partial r} \right) - \frac{V_\theta}{r^2} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 V_\theta}{\partial \theta^2} - \frac{1}{r^2} \frac{\partial V_r}{\partial \theta} + \frac{\partial^2 V_\theta}{\partial z^2} \right] \quad (9)$$

Dirección z, se determina a través Ecuación 10.

$$\rho \left[\frac{\partial V_z}{\partial t} + V_r \frac{\partial V_z}{\partial r} + \frac{V_\theta}{r} \frac{\partial V_z}{\partial \theta} - \frac{V_r V_\theta}{r} + V_z \frac{\partial V_z}{\partial z} \right] = \frac{\partial P}{\partial r} + \rho g_z + \dots$$

$$\dots u \left[\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial V_z}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 V_z}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 V_z}{\partial z^2} \right] \quad (10)$$

2.3. Definición de Términos Básicos

Perforación Direccional: es la desviación intencional en la perforación de un pozo con respecto del trayecto que adoptaría naturalmente.

Presión de Formación: es la presión en los poros de un yacimiento, normalmente la presión hidrostática, o la presión ejercida por una columna de agua desde la profundidad de la formación hasta el nivel del mar.

Reología: es la ciencia de la deformación y el flujo de materia y describe principalmente las propiedades de los materiales en estado fluido y semisólido. El factor común en los materiales que estudia, es que exhiben algún tipo de flujo y, por lo tanto, no pueden tratarse como sólidos.

Revoque: es el residuo depositado sobre un medio permeable cuando un fluido de perforación es forzado contra el medio bajo presión.

Viscosidad: es la propiedad de un fluido que mide la resistencia que este posee a deformarse en la presencia de un esfuerzo cortante

Viscosidad Cinemática: hace referencia a la oposición del fluido a dejarse cortar por la fuerza de la gravedad y está relacionada con la densidad del fluido, es decir, al tener mayor densidad, menor será la misma.

Viscosidad Dinámica: también conocida como absoluta y se define la como la relación existente entre el esfuerzo cortante y el gradiente de velocidad.

CAPÍTULO III

MARCO METODOLÓGICO

Al haber descrito y definido de manera ya más concreta los objetivos de esta investigación, y la información necesaria; y más detallada para poder estudiar los mismos se procedió de esta manera a explicar cuáles eran los métodos que fueron utilizados para, investigar, recolectar datos y por último obtener unos resultados.

En este ámbito, se mostró la descripción de los aspectos que delimitaron el camino a seguir para obtener los resultados, los cuales estuvieron conformados por los siguientes tópicos: tipos de investigación que define el alcance de los objetivos, nivel de la investigación se refiere al grado de profundidad y complejidad con el cual se desea abordar el estudio, diseño de la investigación describen los procedimientos o aspectos operativos de la misma, población y muestra y técnicas e instrumentos de recolección de datos, por último, las fases de la investigación.

3.1 Tipo de investigación

En contexto con el problema y los objetivos de la investigación que se deseaban obtener, la investigación se consideró de tipo *exploratoria*, Hernández (2006) argumenta que:

Los estudios exploratorios se realizan cuando el objetivo es examinar un tema o problema de investigación poco estudiado, del cual se tienen muchas dudas o no se ha abordado antes. Es decir, cuando la revisión de la literatura reveló que tan sólo hay guías no investigadas e ideas vagamente relacionadas con el problema de estudio, o bien, si deseamos indagar sobre temas y áreas desde nuevas perspectivas (p. 79).

En este caso en particular, se estudió el comportamiento dinámico de los fluidos de perforación viscoelásticos al ser desplazados por una bomba Triplex, por ende, abarca perfectamente el concepto ya que no solo, se pretendía medir variables, si no

también se buscaba comprender como estas están relacionadas y se afectan entre sí, para de esta manera entender como estas llegan a intervenir en el diseño de la bomba y el comportamiento del fluido., los cuales eran los objetos de estudio.

3.2 Diseño de investigación

Definiendo el diseño de investigación se permitió clarificar de manera más formal cuáles eran los pasos a seguir para realizar la investigación, que según Hernández (2006), argumenta que:

Una vez precisado el planteamiento del problema, se definió el alcance inicial de la investigación y se formularon las hipótesis, el investigador debe visualizar la manera práctica y concreta de responder a las preguntas de investigación, además de cubrir los objetivos fijados. Esto implica seleccionar o desarrollar uno o más diseños de investigación y aplicarlos al contexto particular de su estudio. El término diseño se refiere al plan o estrategia concebida para obtener la información que se desea (p. 120).

En otras palabras, el diseño de investigación es la estrategia general que se adoptó para responder al problema planteado, existen varios tipos de investigación los cuales pueden ser; Experimental, de Campo o Documental. Según Zorrilla. (1993), “la investigación documental es aquella que se realiza a través de la consulta de documentos (libros, revistas, periódicos, memorias, anuarios, registros, códigos, constituciones, etc.)”.

En concordancia con los objetivos generales de la investigación se identificó la presente investigación como del tipo documental, ya que, el objetivo de la misma era el estudio dinámico de una bomba triplex al desplazar fluido viscoelástico, haciendo uso de herramientas computacionales de aproximación numérica, más específicamente, aplicando el CFD, con el cual se buscaba obtener una serie de datos para su posterior análisis, además se procedió a la recolección de datos por medio de documentos, catálogos u otro tipo de material, para mejorar y ampliar el conocimiento de dicho comportamiento en este tipo de bombas, esto con la finalidad de crear un diseño de la

misma con herramientas especializadas CAD, en conclusión se buscó información en textos, artículos en revistas, trabajos de grado, páginas web, cursos y tutoriales acerca del manejo de los softwares.

3.3 Nivel de la investigación

Se define la investigación como “Una actividad encaminada a la solución de problemas. Su objetivo consiste en hallar respuestas a preguntas mediante el empleo de procesos científicos” (Cervo y Bervian, 1989, p. 41, citado en Arias F, 2006, p.21). Esta podía ser de distintos tipos, en este sentido se pudo clasificar el tipo de investigación, y esto se hizo en función de su nivel que se refiere al grado de profundidad con que se aborda un fenómeno u objeto de estudio, y según el nivel en que se trabaje la investigación.

El objetivo general de la investigación era el estudio dinámico de una bomba triplex al desplazar fluido viscoelástico utilizando métodos de elementos finitos o en este caso CFD. En este orden de ideas el nivel de la investigación fue descriptivo, y éste consistió en la caracterización de un hecho, fenómeno, individuo o grupo, con el fin de establecer su estructura o comportamiento. Hernández (2006), “...señala que la investigación descriptiva busca especificar propiedades, características y rasgos importantes de cualquier fenómeno que se analice. Teniendo como objetivo indagar la incidencia y los valores en que se manifiestan una o más variables al ubicar, categorizar y proporcionar la visión de una comunidad, un evento, un contexto, un fenómeno o situación.”

3.4 Población y muestra

3.4.1 Población

En cuanto a la población Arias, F. (2006) argumenta:

Una característica del conocimiento científico es la generalidad, de allí que la ciencia se preocupe por extender sus resultados de manera que sean aplicables, no sólo a uno o a pocos casos, sino que sean aplicables a muchos casos similares o de la misma clase. En este sentido, una

investigación puede tener como propósito el estudio de un conjunto numeroso de objetos, individuos, e incluso documentos. A dicho conjunto se le denomina población (p. 81).

Existen una variedad de tipos de población en las investigaciones, las mismas se encuentran delimitadas por los objetivos y problemas en estudio, estos poseen una clasificación entre los cuales se pudo encontrar: Población finita, Población infinita por último, encontramos población accesible, también denominada población muestreada, esta se define como, “ la porción finita de la población objetivo a la que realmente se tiene acceso y de la cual se extrae una muestra representativa, el tamaño de la población accesible depende del tiempo y de los recursos del investigador”.(Arias y otros, 1989 citado por Arias, F. (2006) p.82).

Aclarado esto, la población de la presente investigación fue, del tipo de población accesible, las cuales eran las diferentes curvas típicas generadas mediante la herramienta de CFD, las cuales representaron las variables que interviene en el desplazamiento del fluido viscoelástico dentro de la bomba triplex, así como también éste afecta a la misma y esto es lo que se deseaba estudiar. El término población se refiere a “...cualquier conjunto de elementos de los que se quiere conocer o investigar alguna o algunas de sus características.” (Alcaide, citado por Balestrini, 2001).

3.4.2 Muestra

La muestra es un “subconjunto representativo de un universo o población” (Morles, 1994, p. 54, citado en Arias F, 2006, p.110). Consideremos ahora la muestra del presente proyecto, en el que se tuvo una muestra del tipo no probabilística, que según Hernández (2006) dice:

En las muestras no probabilísticas, la elección de los elementos no depende de la probabilidad, sino de causas relacionadas con las características de la investigación o de quien hace la muestra. Aquí el procedimiento no es mecánico ni con base en fórmulas de probabilidad, sino que depende del proceso de toma de decisiones de un investigador o de un grupo de

investigadores y, desde luego, las muestras seleccionadas obedecen a otros criterios de investigación (p.176).

El tipo de muestreo fue no probabilístico y este es aquel en la cual no puede calcularse la probabilidad de extracción de una determinada muestra. Se aplica fundamentalmente en investigaciones en la que la población en estudio no cumple con las ecuaciones probabilísticas, por tanto, la muestra seleccionada eran los diferentes puntos y nodos que se generaron por la discretización del dominio fluidizado en los cuales se valoran las características del fluido mediante la herramienta de CFD.

3.5 Técnicas e instrumentos de recolección de datos

De acuerdo con Hernández, Fernández y Baptista (2006) se define a la técnica de recolección de datos como “las observaciones que consisten en el registro sistemático, cálido y confiable de comportamientos o conductas”. Las técnicas para la recolección de datos fueron básicamente: entrevistas, revisiones bibliográficas, observaciones directas, registros de prensa, entre otras. Existen diversos instrumentos para la recolección de estos datos los cuales son: computadores, lápiz, hojas, grabadoras, fotografías, entre otras.

Las técnicas utilizadas en la presente investigación serán:

- Localización y consolidación de los datos.
- Revisión documental: Esta técnica se realizó con el fin de profundizar la información recopilada con todas las aplicadas anteriormente, esta comprendía la búsqueda de la información de documentos empresariales, que contribuyan al conocimiento del comportamiento de sucesos realizados que sirvan de apoyo para el desarrollo de teorías pertinentes para la resolución de problemas. (Candelo, 2006).

Y, por último, se contó con la utilidad de computadoras para conseguir los resultados obtenidos por la simulación que describieron el comportamiento del fluido viscoelástico al desplazarse por las cámaras de la bomba triplex, con los cuales se procedió a comparar con valores experimentales realizados anteriormente y/o formular

hipótesis en base a los principios de conservación para lograr la validación de los mismos.

3.6 Fases de la Investigación

Entiéndase por fases de la investigación como la serie de pasos que debe tomar el investigador y el orden con los que lo llevaran a cabo, con la finalidad de ir respondiendo en una determinada secuencia los objetivos específicos de la investigación, dándole así de esta manera la oportunidad de administrar de la forma más efectiva y eficaz el tiempo de trabajo que se invirtió en estos, para poder lograr el objetivo general de la investigación, la cual consto de cuatro fases:

Fase I: Revisión de las características de los fluidos de perforación viscoelásticos que permitan la selección de un sistema en particular.

En esta primera fase, se estudiaron las características y modelos que rigen diferentes tipos fluidos viscoelásticos, para luego proceder a la selección de un tipo en particular que cumpla con las condiciones necesarias para la presente investigación, tomando como referencia valores de investigaciones de campo anteriores.

Fase II: Caracterización de los elementos constitutivos de una bomba de desplazamiento positivo triplex.

Se procedió a la recopilación de la información concerniente a cuáles son los elementos que constituyen a una bomba triplex y determinar cuál es su función en el sistema de la bomba. Al momento del estudio, es importante no obviar ninguno de estos, pues los mismos afectan directamente al comportamiento tanto de bomba como del fluido al ser desplazado.

Luego de esto se hizo la selección de un modelo de bomba triplex en particular para, así usar sus datos nominales para esta investigación.

Fase III: Modelado de la geometría de una bomba triplex mediante el uso de una herramienta CAD.

Después de investigar, entender y determinar cuáles son los elementos que componen una bomba triplex, conociendo los requisitos de trabajo y el tipo de fluido que se va a manejar, se procedió a modelar la bomba que fue la seleccionada para estudiar. Luego, al obtener las dimensiones y características propias, utilizando una herramienta CAD se modeló y desarrolló en 3D el modelo escogido.

Fase IV: Simulación del flujo viscoelástico en la geometría seleccionada y diseñada utilizando CFD.

En esta cuarta fase de la investigación, con ayuda de la herramienta de CFD seleccionada se simuló el modelo de la bomba especificado en la fase anterior; lo cual hizo posible analizar el comportamiento del fluido y de qué manera este llega a afectar los elementos de la bomba triplex y así se pudo llegar a una serie de conclusiones.

Fase V: Análisis de los resultados obtenidos en la simulación mediante el uso de datos y gráficos

En esta última fase, se extrajeron todos los resultados obtenidos en la simulación de CFD y se expresaron utilizando datos, gráficas y videos. Consecutivamente, se realizó el análisis de los resultados con las conclusiones y recomendaciones con respecto a la problemática.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS

4.1. Revisión de las características de los fluidos perforación viscoelásticos que permitan la selección de un sistema en particular.

En el capítulo II, es decir, en las bases teóricas de esta investigación se hizo énfasis en la recopilación de los datos e información disponibles y más reciente acerca de los fluidos de perforación viscoelástico, más específicamente desde los ítems (2.2.1 hasta 2.2.8); datos como características y modelos que rigen dichos fluidos.

Seguidamente apoyados en el trabajo de Malaver (2012). Y sus resultados obtenidos experimentalmente procedimos a la extracción de las distintas formulaciones de sistemas viscoelásticos expuestos y sus propiedades.

LECTURAS	FORMULACIONES				
	A2	A3	B1	B3	C3
L100	27	29	27	31	29
L6	10	15	14	17	15
L3	8	12	12	15	13
VP	13	9	10	10	11
PC	27	31	27	31	30
GEL 10"	9	12	12	15	15
N	0,407	0,346	0,411	0,386	0,414
K	3,098	4,010	2,302	2,871	2,691
Tau0	2,25	5,87	8,12	10,17	9,89

Figura 13. Resultados reológicos experimentales.

Fuente: Malaver A. (2012) "Formulación de un fluido viscoelástico para la perforación de la sección horizontal con aplicación en los campos Bare y Melones del distrito San Tomé"

VP: Viscosidad Plástica (cPs)
PC: Punto Cedente (Lbs/100pies²)
n: Índice de fluidez
K: Índice de consistencia (Lbs.sⁿ/pie²)
Tau0: Esfuerzo de corte inicial (Lbs/100pies²)

Figura 14. Leyenda de las características del fluido de perforación viscoelástico
Fuente: Malaver A. (2012) “Formulación de un fluido viscoelástico para la perforación de la sección horizontal con aplicación en los campos Bare y Melones del distrito San Tomé”

Entendiéndose que L100, L6 y L3 son las lecturas del viscosímetro Brookfield a 100, 6 y 3 RPM se seleccionó entre las formulaciones al fluido B1 (recomendado en el trabajo de Malaver A.) al ser el que cumple con todos los parámetros establecidos y haber obtenido los mejores resultados experimentales. Entre los resultados se destaca una densidad estándar de $\rho = 8.7 \left(\frac{lb}{galon} \right)$, un esfuerzo de corte inicial (τ_0) de 8,12 $lb/100pie^2$ (281.056 Pa) que permite un esfuerzo menor por parte de las bombas de perforación para dar movimiento al fluido y las lecturas de bajo corte entre 14 y 12 (L6 y L3) respectivamente fueron las más acertadas para una limpieza del hoyo horizontal ya que garantizan una suspensión de los ripios cuando se paran las bombas, ya sea por cambio de tubería o por cualquier operación que amerite el detener dichas bombas.

4.2 Caracterización de los elementos constitutivos de una bomba de desplazamiento positivo triplex.

Los elementos que constituyen una bomba triplex más relevantes se han explicado, en las bases teóricas de esta investigación, específicamente desde los ítems (2.2.10 hasta 2.2.14), recordando que las bombas triplex se encuentran constituidas por dos partes fundamentales, el “Power End” que consiste en todo el sistema mecánico y el “Fluid End” que son todos los componentes del sistema hidráulico.

Tomando como referencia el “User Manual FD-1600 Triplex Mud Pump” (Manual de usuario FD-1600 Bomba Triplex de Lodo), se hizo la selección del Modelo FD-1600 de las bombas aquí descritas, obteniendo las siguientes características.

Especificaciones	
Tipo	3 Pistones de Simple Acción
Presión	3.423 psi (240 kg/cm ²)
Caudal	719 gpm (2.721 litros/min)
Carreras del Pistón por Minuto	120 SPM (Stroke per Minute)
Potencia Nominal	1600 HP (1193 KW)
Diámetro x Carrera del Pistón	7" x12" (178mmx304.8mm)
Manifold de Entrada (Succión)	12" (305mm)
Manifold de Salida (Descarga)	5" (127mm)
Relación de Transmisión	4,31:1
Asientos de Válvula	API #7
Lubricación	Presión y Salpicadura en Todas las Partes Móviles
Peso Aproximado	58.478 Lbs (23.804 kg)

Figura 15. Especificaciones Modelo FD-1600.

Fuente: National Oilwell Vargo (S/F). FD-1600 Triplex Mud Pump.

Dimensiones Generales FD-1600		
	Pulgadas	Milímetros
A	5'-0-5/8"	1540
B	5'-7-13/16"	1722
C	4'-0-1/8"	1222
D	4'-8-1/16"	1424
E	13-3/16"	335
F	4'-3-3/4"	1315
G	4'-11-3/4"	118
H	7'-10"	2388
J	8'-11-7/8"	2740
**K	4'-10-1/4"	1480
L	8,5"	215,9
M	5'-5-3/4"	1670
N	6'-10"	2083
P	6'-1-3/8"	1864
Q	16'	4877
R	1'-9-3/4"	553
S	12-1/4"	311
T	1'-1-3/4"	419
U	2'-6-1/4"	349
V	12-9/16"	768
W	12-9/16"	319
X	1'-7-1/4"	489

Figura 16. Dimensiones generales Modelo Fd-1600.

Fuente: National Oilwell Vargo (S/F). FD-1600 Triplex Mud Pump.

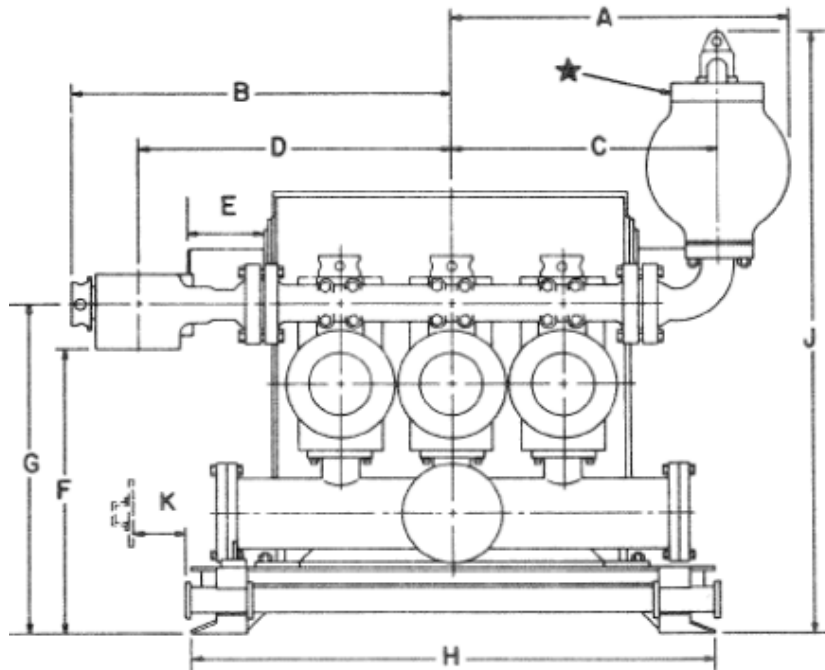


Figura 17. Vista Frontal Bomba Triplex modelo FD-1600
Fuente: National Oilwell Vargo (S/F). FD-1600 Triplex Mud Pump

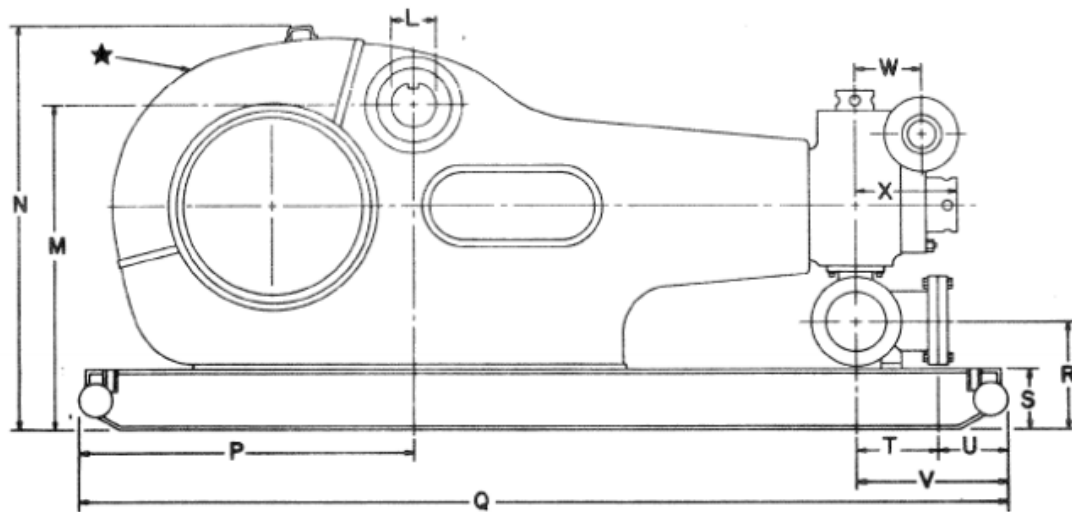


Figura 18. Vista lateral Bomba Triplex modelo FD-1600.
Fuente: National Oilwell Vargo (S/F). FD-1600 Triplex Mud Pump.

4.3 Modelado de la geometría de una bomba triplex mediante el uso de una herramienta CAD.

Con los datos, características y dimensiones extraídos de la fase anterior, se realizó el modelado de la geometría de la Bomba Triplex FD-1600, se hizo especial énfasis en las secciones y elementos que están involucrados con los intereses del estudio involucrado en la presente investigación.

Todo esto fue realizado utilizando el software de diseño asistido por computadora o CAD por sus siglas en inglés, “SolidWorks” en su versión de 2019, programa para modelado mecánico en 2D y 3D; este permite modelar piezas y conjuntos y extraer de ellos tanto planos técnicos como otro tipo de información necesaria para la producción.

4.3.1 Proceso de Diseño del Modelo

4.3.1.1 Power End

4.3.1.1.1 Carcasa

En primer lugar, como no es de relevancia para los estudios de la investigación y su función será netamente visual y demostrativo, se importó la carcasa de un trabajo de modelado previo de una bomba Triplex de la serie FD.

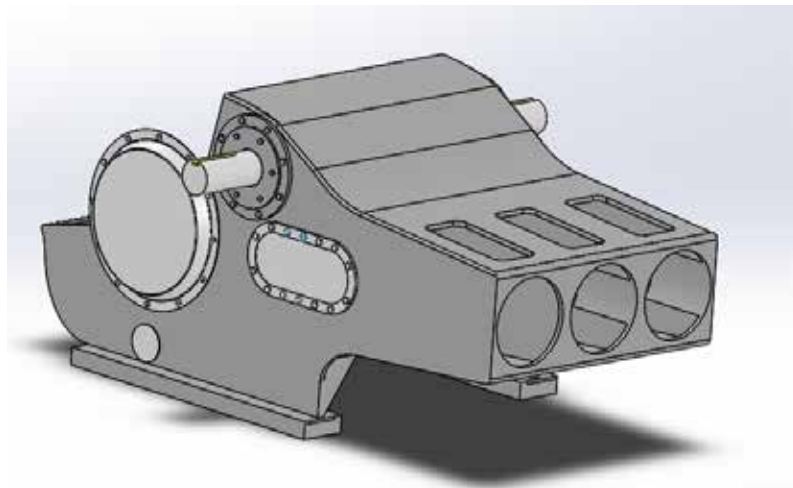


Figura 19. Carcasa Power End.

Fuente: Jiménez D. (2019).

4.3.1.1.2 Cigüeñal

Este elemento es una parte importante en el modelo de la bomba, se hizo el mismo procedimiento que con el modelo anterior se descargó directamente un archivo, pero de la misma manera solo será de carácter visual y demostrativo.

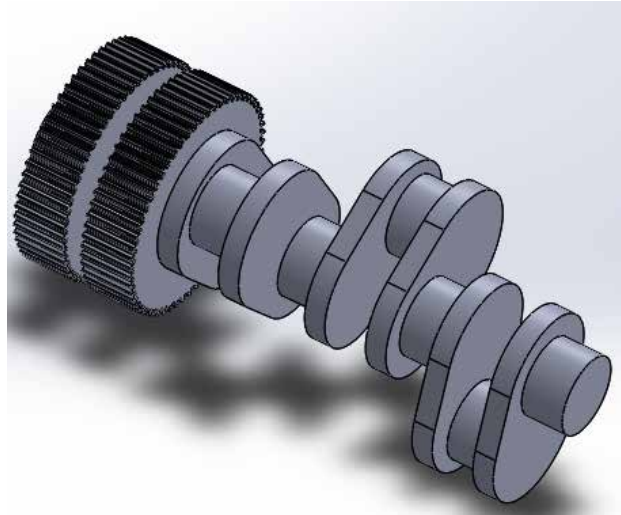


Figura 20. Cigüeñal Power End.
Fuente: Jiménez D. (2019).

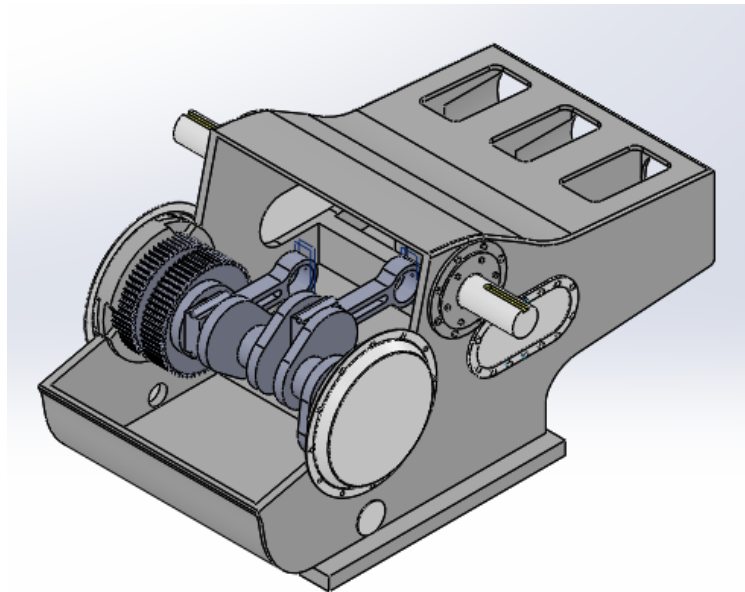


Figura 21. Ensamble Power End.
Fuente: El Atrache y Vázquez (2020).

4.3.1.2 Fluid End

Este componente es el elemento constitutivo en donde se desempeña el paso del fluido de perforación a través de la bomba hidráulico, es decir, el punto de interés de la investigación. Este diseño se realizó paso a paso desde cero, además se hizo mayor énfasis en la cámara de flujo ya que este es exactamente donde se estudió el comportamiento dinámico del fluido de perforación viscoelástico al ser desplazado por la bomba. Luego de explicar el diseño de dichos elementos, se ilustrará el ensamble del Fluid End.

4.3.1.2.1 Manifold de Alta (Tubería de descarga)

Se inicio creando un croquis con tres círculos del mismo diámetro a una distancia equidistante, se les coloco un espesor igual a cada uno y acoto. Posterior, se realiza una operación de extrusión al croquis, para obtener las tres tuberías de salida de la descarga de la bomba (figura 22).

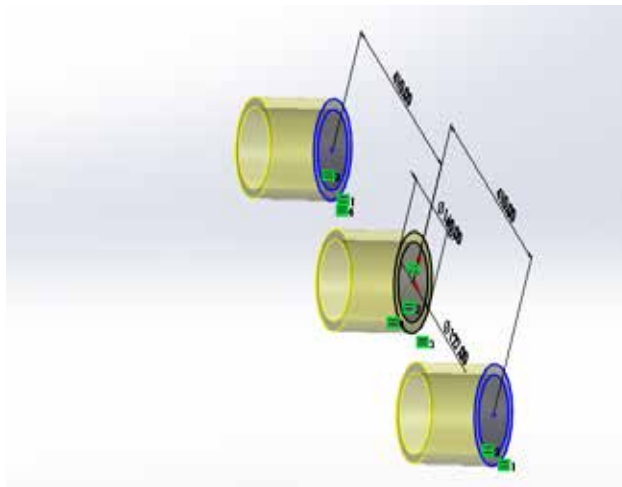


Figura 22. Croquis (al fondo) y extrusión 1 (Amarillo) de las tuberías de salida.

Fuente: El Atrache y Vázquez. (2020).

Luego, se creo un nuevo croquis en un plano paralelo al anterior, en el cual se hizo un círculo con el mismo espesor y diámetro de la tubería del paso anterior que después se le realizo una extrusión para alcanzar la geometría básica del manifold de alta (Figura 23).

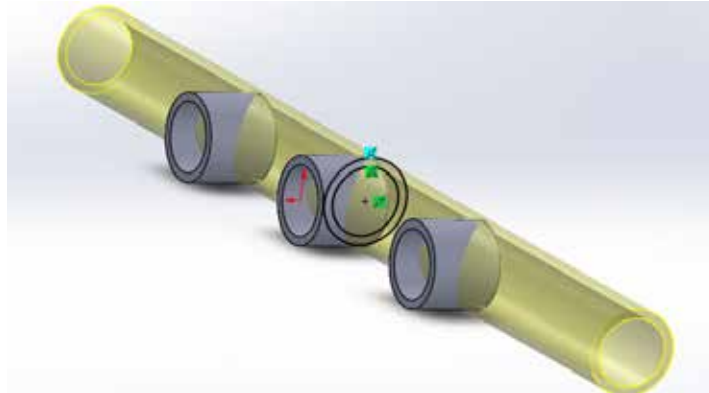


Figura 23. Croquis y extrusión 2, del Manifold de Alta.
Fuente: El Atrache y Vázquez. (2020).

Se realizó un corte en las tres tuberías, para que se interconectaran con la tubería principal.

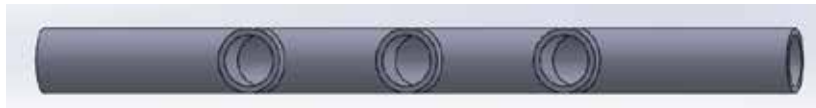


Figura 24. Corte 1, Manifold de Alta.
Fuente: El Atrache y Vázquez. (2020).

Seguido, se creó un tercer croquis en el plano paralelo al del segundo croquis, detallando dos círculos, para modelar la brida de la tubería principal del manifold de alta, además se hizo la extrusión del mismo y por último se usó la herramienta “mirror” (espejo) para modelar respectivamente la brida del otro extremo de la tubería (Figura 25 y 26).

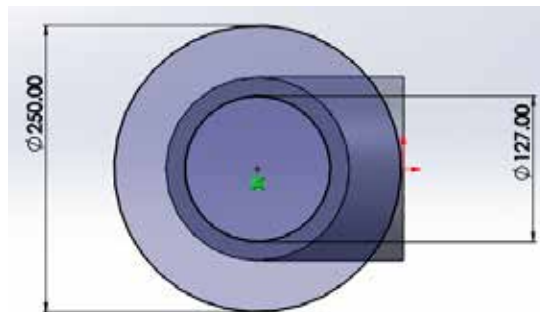


Figura 25. Croquis 3, Manifold de Alta.
Fuente: El Atrache y Vázquez. (2020).

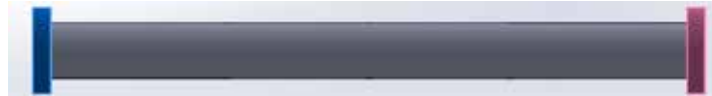


Figura 26. Extrusión 3 y Mirror 1, Manifold de Alta.
Fuente: El Atrache y Vázquez. (2020).

Para finalizar se hizo un croquis en la cara de las bridad para modelar los orificios de las mismas (Figura 27 a), con la herramienta “matriz circular” se agregaron los círculos necesarios en la misma, se generó un corte y de nuevo la herramienta “mirror” para que se aplicara lo mismo en las bridas del otro extremo (Figura 28 b).



Figura 27. Croquis 4, Corte 2 y Mirror 2, Manifold de Alta.
Fuente: El Atrache y Vázquez. (2020).

4.3.1.2.2 Manifold de Baja (Tubería de succión)

Se inicio creando un croquis con tres círculos del mismo diámetro a una distancia equidistante (Figura 28 a), se les coloco un espesor igual a cada uno y acoto. Luego se hizo la extrusión de los mismo modelando así las tuberías que se conectan en la succión de la bomba (Figura 28 b).

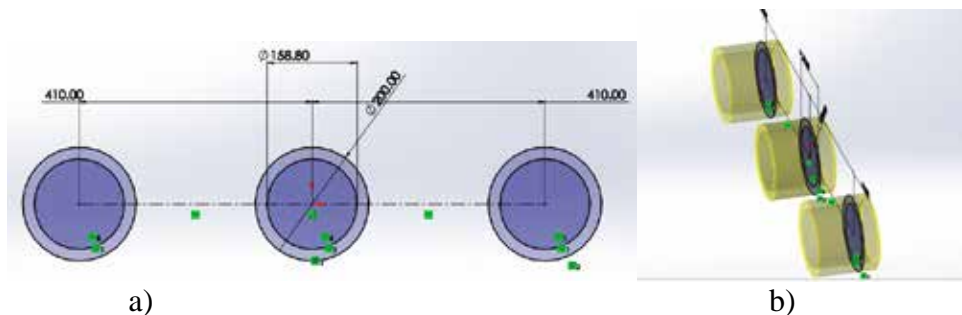


Figura 28. Croquis 1 y Extrusión 1, Manifold de Baja
Fuente: El Atrache y Vázquez. (2020)

Se creo un nuevo croquis en un plano paralelo al anterior, en el cual se hizo un círculo con espesor, luego Se hizo la extrusión del croquis 2 obteniendo el modelado de la tubería principal del Manifold de baja (Figura 29).

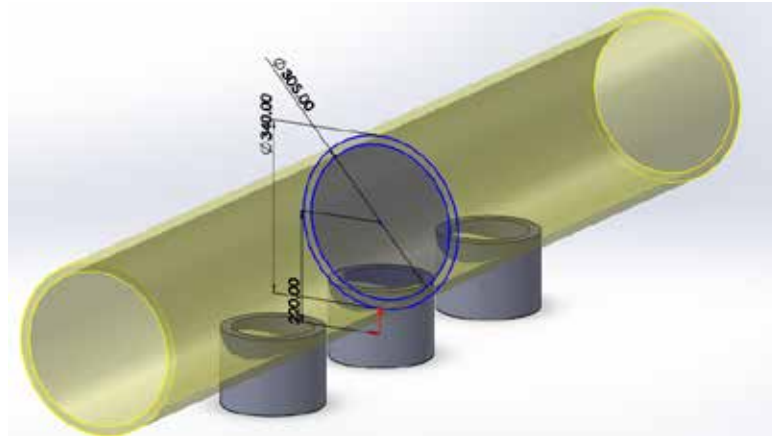


Figura 29. Croquis 2 y Extrusión 2, Manifold de Baja.

Fuente: El Atrache y Vázquez. (2020).

Se creo un tercer croquis (Figura 30 a) en el plano paralelo al del segundo croquis, detallando dos círculos, para modelar la brida de la tubería principal del manifold de alta, además se hizo la extrusión del mismo (Figura 30 b) y por último se usó la herramienta “mirror” (espejo) para modelar respectivamente la brida del otro extremo de la tubería (Figura 31).

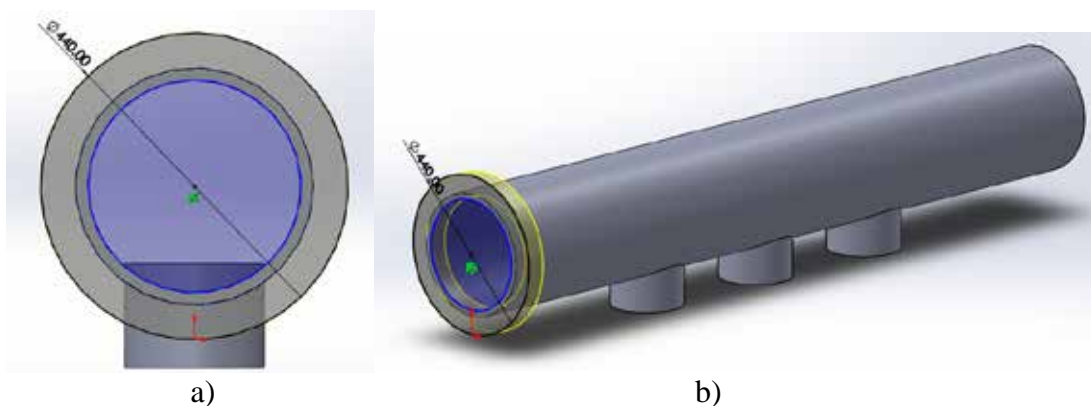


Figura 30. Croquis y Extrusión 3, Manifold de Baja.

Fuente: El Atrache y Vázquez. (2020).



Figura 31. Mirror 1, Manifold de Baja.
Fuente: El Atrache y Vázquez. (2020).

Para finalizar se hizo un croquis en la cara de las bridad para modelar los orificios de las mismas, con la herramienta “matriz circular” se agregaron los círculos necesarios en la misma (Figura 32 a), se generó un corte y de nuevo la herramienta “mirror” para que se aplicara lo mismo en las bridas del otro extremo (Figura 32 b).

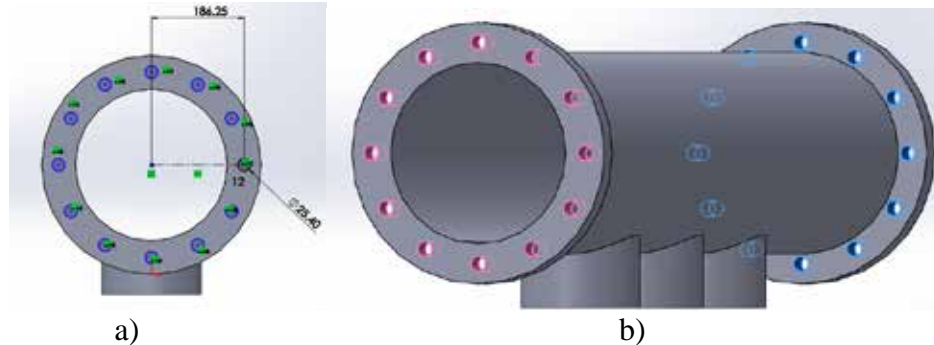


Figura 32. Croquis 4, Corte y Mirror 2, Manifold de Baja.
Fuente: El Atrache y Vázquez. (2020).

4.3.1.2.3 Tapa frontales

El modelado de este dispositivo requirió de 3 croquis, en planos paralelos entre sí y tres extrusiones para generar los distintos diámetros del mismo y por último cortes en las puntas para representar donde se acopla o desacopla este dispositivo (Figura 33).

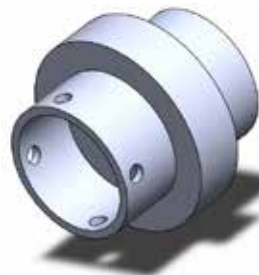


Figura 33. Tapas Frontales.
Fuente: El Atrache y Vázquez. (2020).

4.3.1.2.4 Pistón

Este diseño requirió de un croquis (Figura 34 a) y una herramienta de extrusión de solido en revolución (Figura 34 b).

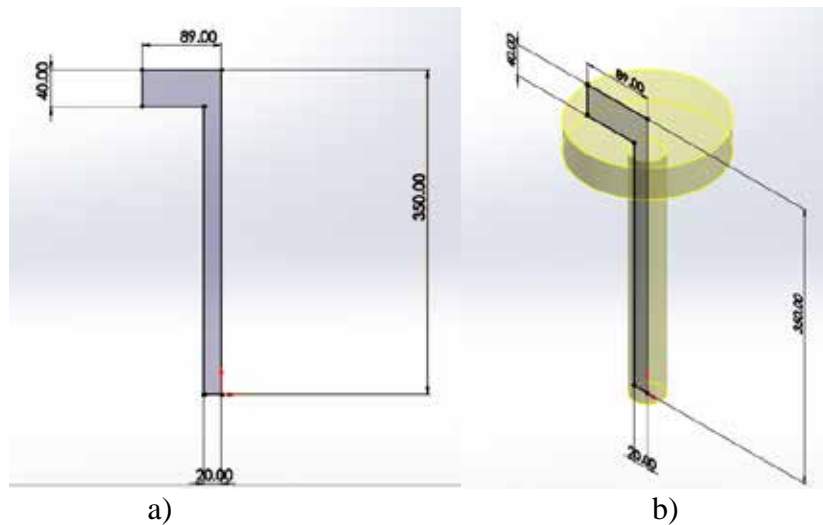


Figura 34. Croquis y Revolución, Vástago - Pistón.

Fuente: El Atrache y Vázquez. (2020).

4.3.1.2.5 Cámara del Pistón

El modelado comenzó con un croquis (Figura 35 a) circular al cual se le aplicó una extrusión (Figura 35 b), seguidamente de otro croquis igualmente circular con un diámetro mayor al que se le aplicó otra extrusión (Figura 35 c).

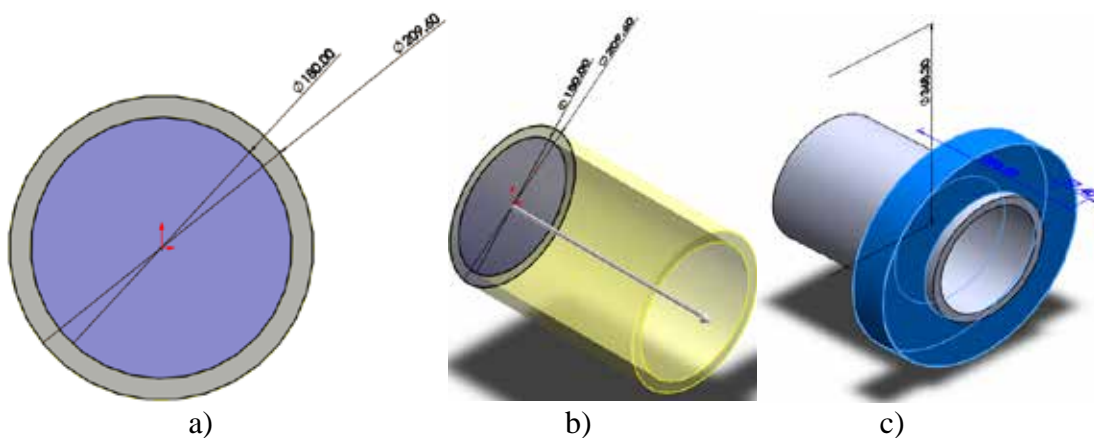


Figura 35. Croquis y Operaciones de la Cámara del Pistón.

Fuente: El Atrache y Vázquez. (2020).

4.3.1.2.6 Cámara de Flujo

Se inicio haciendo un croquis con una sección rectangular (Figura 36 a), para luego hacer una extrusión (Figura 36 b).

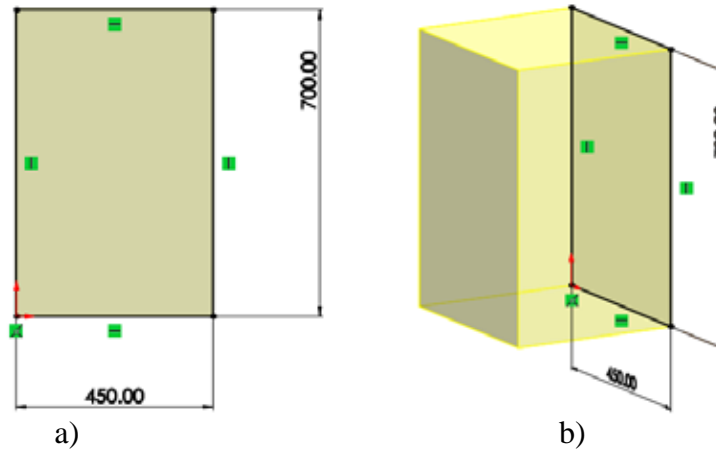


Figura 36. Croquis y Extrusión 1, Cámara de Flujo.

Fuente: El Atrache y Vázquez. (2020).

Seguidamente, se designó un plano auxiliar perpendicular al croquis inicial y paralelo a dos de las caras de la extrusión 1 (Figura 37 a) para establecer un croquis con las dimensiones de la sección circular de diámetros variables que atraviesa horizontalmente la cámara de flujo (Figura 37 b). Posterior, se hizo un corte en revolución para obtener la parte horizontal de la geometría interior (Figura 38).

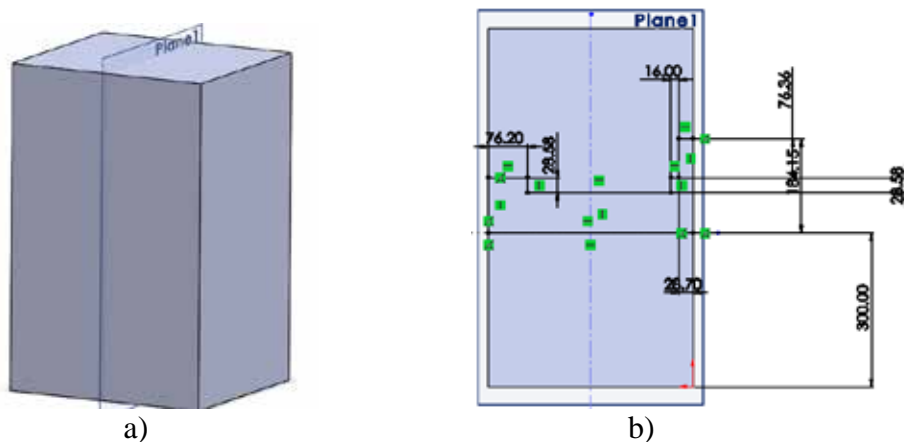


Figura 37. Plano 1 y Croquis 2, Cámara de flujo.

Fuente: El Atrache y Vázquez. (2020).

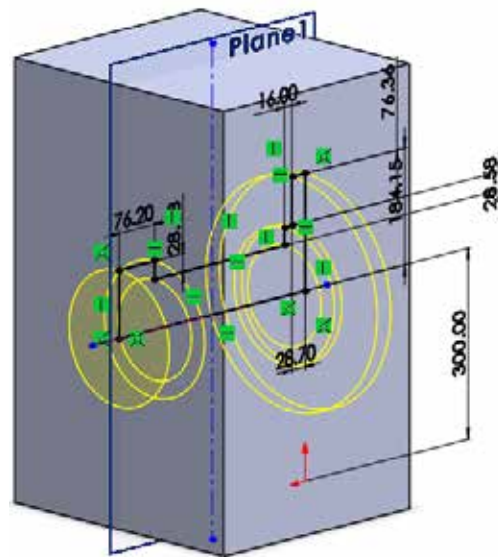


Figura 38. Corte en revolución 1, Cámara de Flujo.
Fuente: El Atrache y Vázquez. (2020).

Seguidamente se hizo un nuevo croquis en el dicho plano auxiliar (Figura 39 a), en el cual se hizo otro corte en revolución para establecer geometría de diámetro variable que atraviesa la cámara de flujo verticalmente (Figura 39 b).

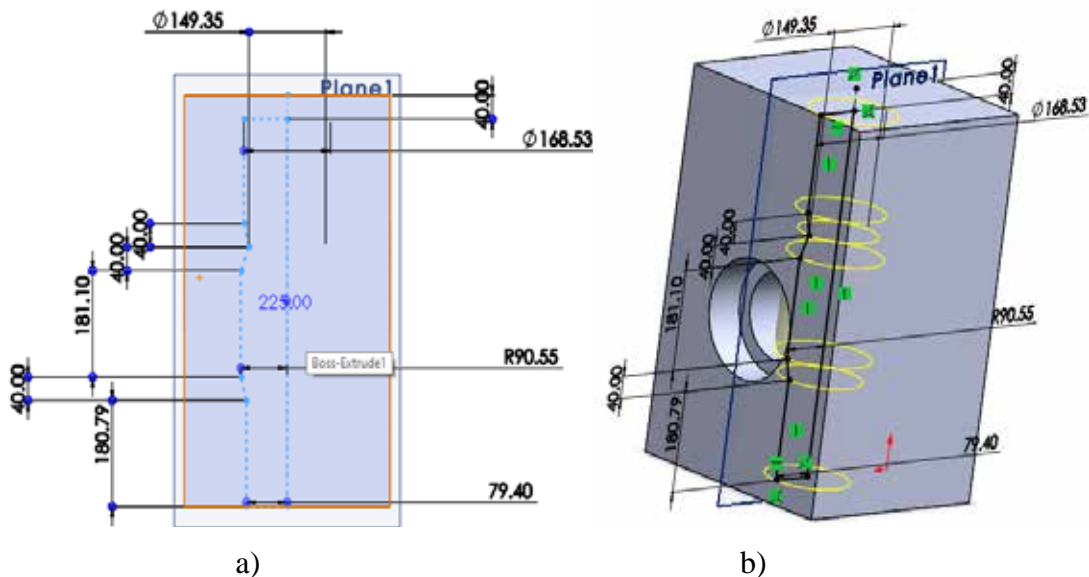


Figura 39. Croquis 3 y Corte en revolución 2, Cámara de flujo.
Fuente: El Atrache y Vázquez. (2020).

Para culminar la geometría interna de la cámara de flujo se realizó un croquis de un círculo en la cara frontal de la cámara (Figura 40 a). Luego en el plano auxiliar colocado anteriormente se hizo una línea inclinada que delimitaría la trayectoria que llega hasta la geometría descrita en el paso anterior (Figura 40 b). Estos dos croquis se utilizan en la herramienta corte de barrido para crear la geometría inclinada que conecta el interior de la de la cámara de flujo con la salida hacia el manifold de descarga (Figura 41).

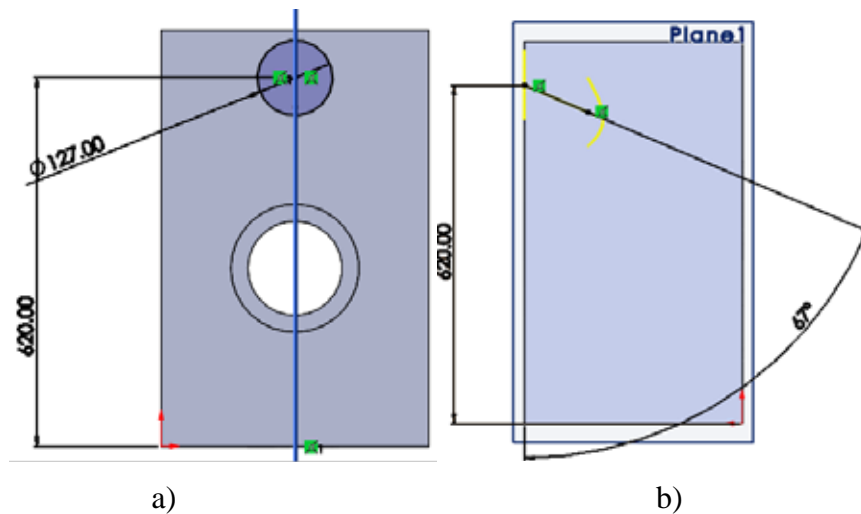


Figura 40. Croquis 4 y Croquis 5, Cámara de Flujo.

Fuente: El Atrache y Vázquez. (2020).

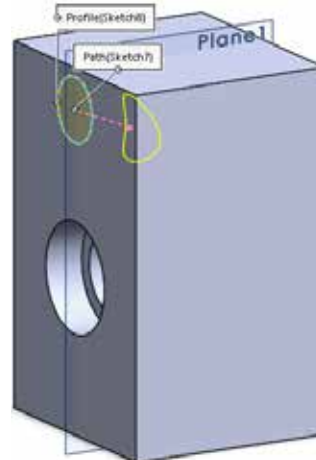


Figura 41. Corte de barrido, Cámara de Flujo.

Fuente: El Atrache y Vázquez. (2020).

4.3.1.2.7 Ensamble del Fluid End

Utilizando las partes ya diseñadas, se procedió a ensamblar mediante el uso de relaciones mecánicas y de posición los distintos elementos que conforman el Fluid End de la bomba (Figura 42).

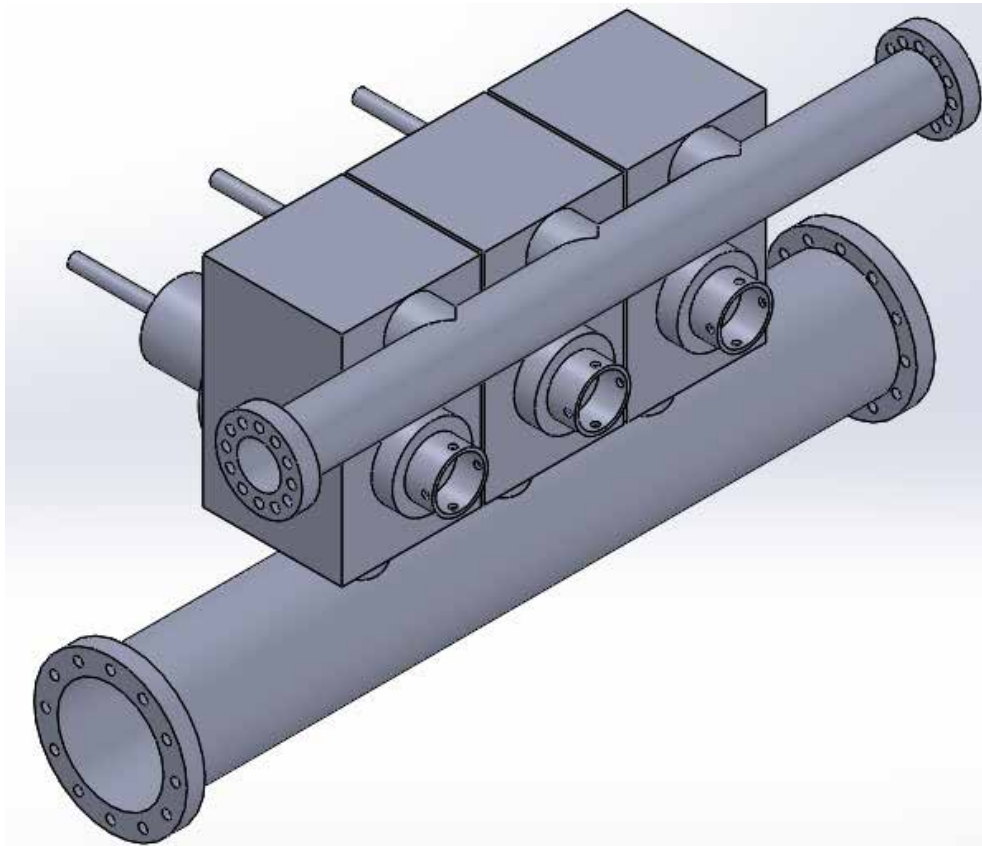


Figura 42. Corte de barrido, Cámara de Flujo.

Fuente: El Atrache y Vázquez. (2020).

Para poder realizar el estudio dinámico en el campo fluidizado, se realizaron dos cortes transversales a una de las cámaras del Fluid End en dos instantes de tiempo diferentes para poder estudiar de forma separa la etapa de carga (Figura 43) y la etapa de descarga del fluido (Figura 44). También, se descartaron los elementos que no intervenían en el rango del dominio fluidizado donde se realizó la simulación.

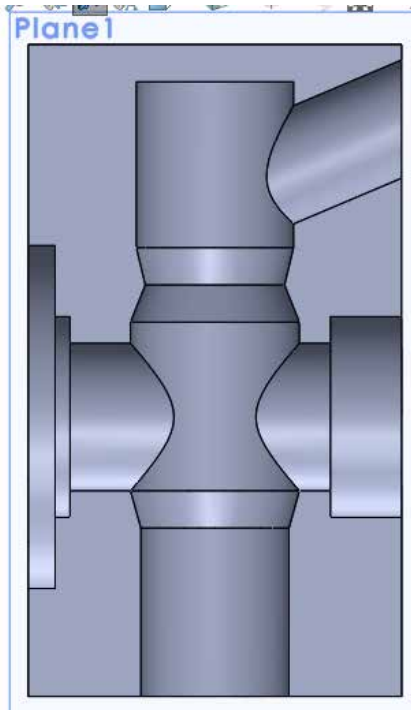


Figura 43. Corte Transversal de la Cámara de Flujo, Etapa de Carga.
Fuente: El Atrache y Vázquez. (2020).

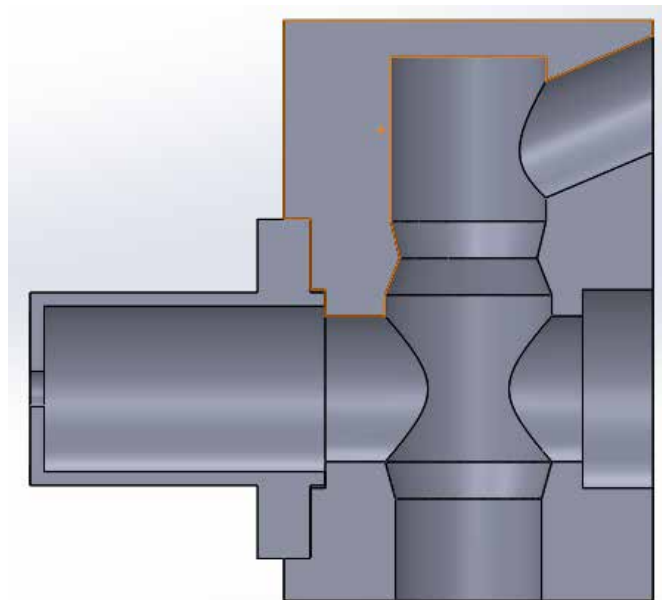


Figura 44. Corte Transversal de la Cámara de Flujo, Etapa de Descarga.
Fuente: El Atrache y Vázquez. (2020).

4.3.1.3 Ensamble de la Bomba

Finalmente, se realiza un ensamble del Power End y el Fluid End de forma representativa para demostrar la geometría final de la bomba (Figura 45).

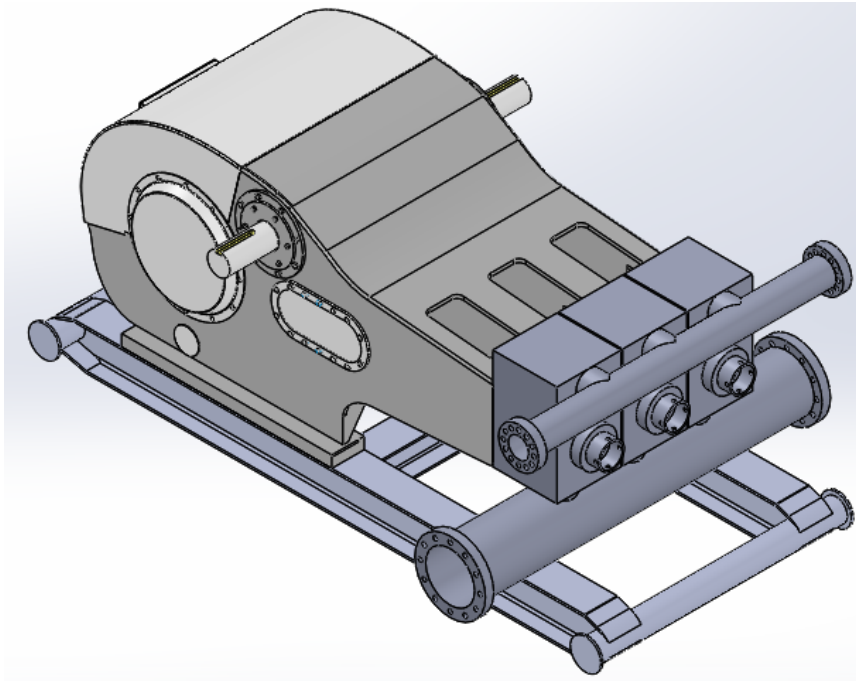


Figura 45. Ensamble Final Bomba Triplex FD-1600.

Fuente: El Atrache y Vázquez. (2020).

4.4 Simulación del flujo viscoelástico en la geometría seleccionada y diseñada utilizando la herramienta de CFD

Una vez que se determinó y dimensionó específicamente el área de estudio de interés para la presente investigación, se procedió a simular el flujo del fluido de perforación viscoelástico en el dominio fluidizado de la bomba triplex (Cámara de Flujo), haciendo uso del módulo de CFD de la herramienta de análisis de elementos finitos CFD COMSOL Multiphysics 4.5.

4.4.1 Condiciones Generales del Estudio

Al ingresar a COMSOL Multiphysics se crea un archivo nuevo seleccionando la opción “Asistente de modelo” (Figura 46 a), luego se selecciona la opción de trabajar

en 2 dimensiones (2D) con el fin de conseguir los mismos resultados que en una simulación en 3D, pero con un ahorro en tiempo y poder de computo considerable (Figura 46 b).

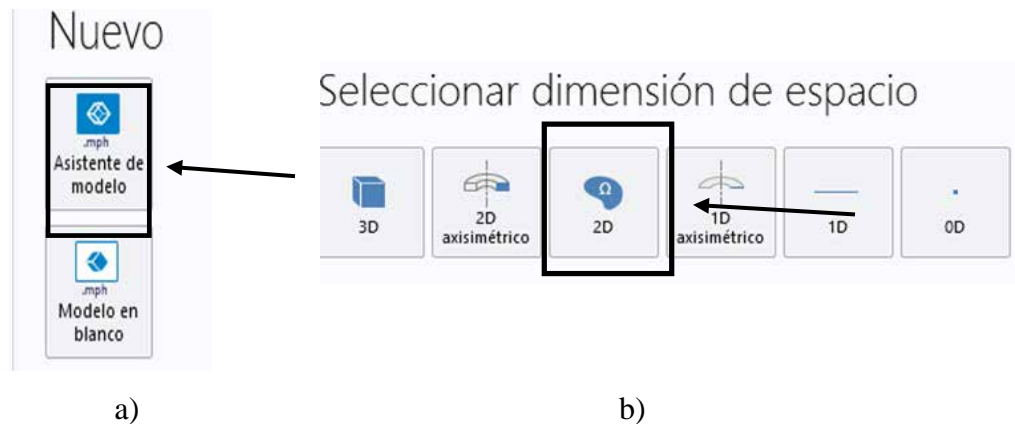


Figura 46. Selección de Procedimiento y Dimensión Espacial del Archivo.

Fuente: El Atrache y Vázquez. (2020).

Después, se selecciona la física específica a utilizar, que en este caso es Flujo (Figura 47). Por último, se escoge un estudio estacionario en donde se hará un barrido especial para obtener distintos instantes de tiempo (Figura 48).

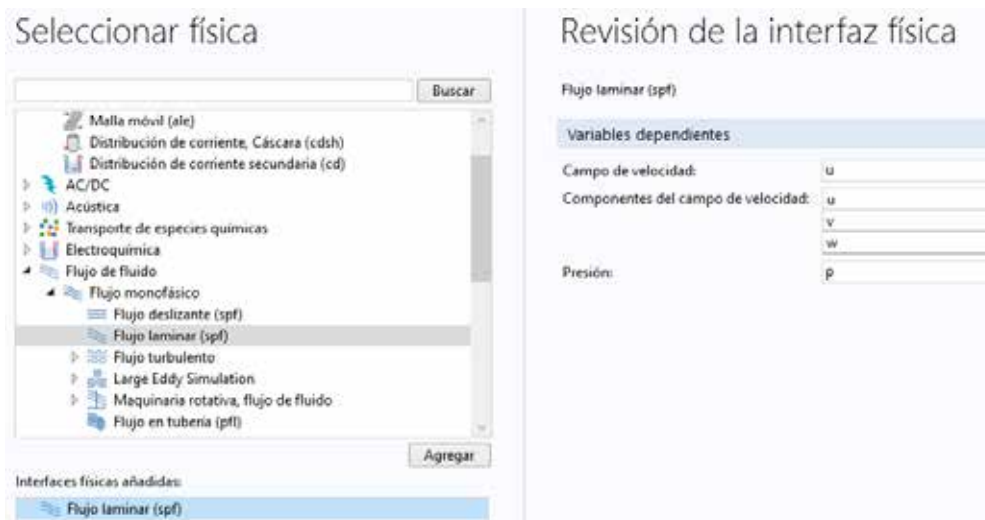


Figura 47. Selección de la Física del Modelo.

Fuente: El Atrache y Vázquez. (2020).

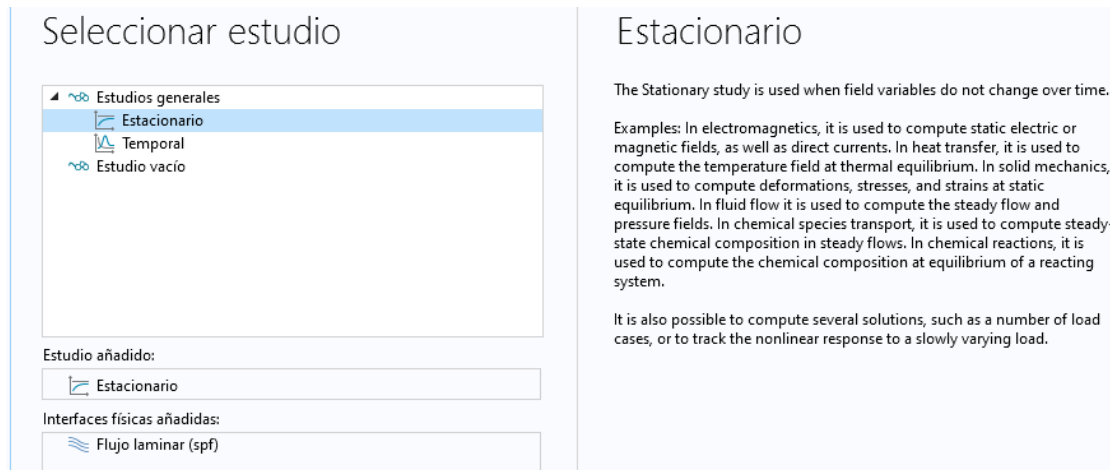


Figura 48. Selección de Procedimiento y Dimensión Espacial del Archivo

Fuente: El Atrache y Vázquez. (2020).

Al definir todas condiciones generales para la simulación en general, se determinó dividirla en dos simulaciones distintas, en la primera se estudió la etapa de carga (cuando se llena la cámara de flujo) y en la segunda la etapa de descarga (cuando es expulsado el fluido de la bomba), con el fin de obtener simulaciones más sencillas, fáciles de converger y rápidas en cuanto a tiempo y poder computacional.

4.4.2 Simulación de la Etapa de Carga

El estudio de la carga consiste en estudiar el pistón en el intervalo que va desde la posición más alejada con respecto al Power End, es decir, al final de una carrera ($t = 0s$, para el estudio) hasta el inicio de una carrera o la posición más cercana con respecto al Power End ($t = 0,25s$, para el estudio).

4.4.2.1 Importado de la Geometría

Se utilizó el plano de la sección transversal de la cámara de flujo cuando el pistón está al final de su carrera (Figura 43) para importar el dominio fluidizado al programa COMSOL Multiphysics y establecerlo como la geometría del componente en el cual se hará la simulación de la etapa de carga (Figura 49).

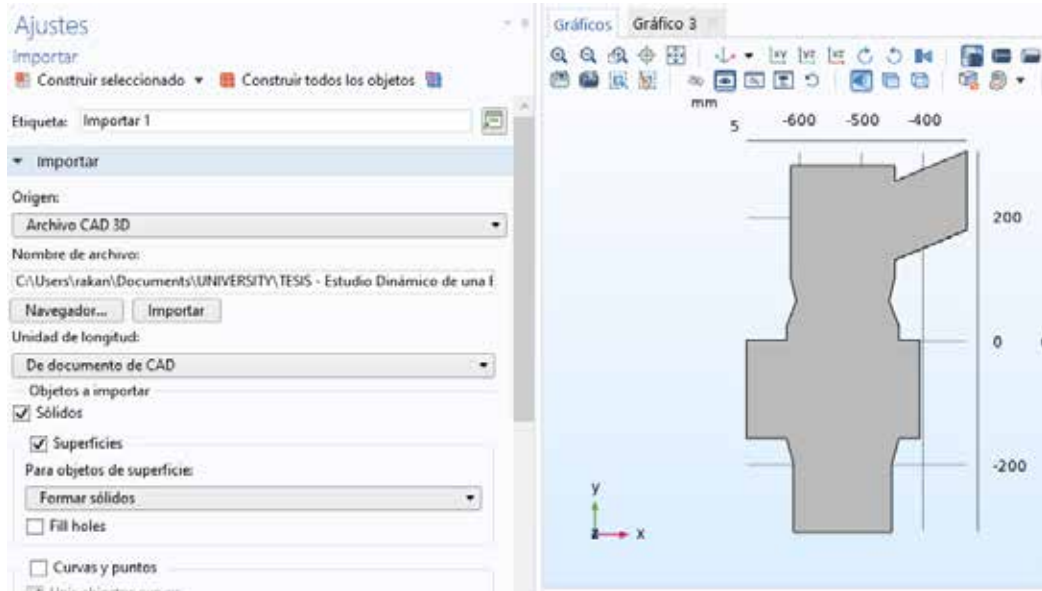


Figura 49. Importado de la Geometría del Dominio Fluidizado, Etapa de Carga.
Fuente: El Atrache y Vázquez. (2020).

4.4.2.2 Parámetros y Variables de la Etapa de Carga

Se definen las constantes a utilizar en la simulación como parámetros (Figura 50). Luego, se usan esos parámetros para crear una función analítica que describa el movimiento del pistón en la carga (Figura 51). Finalmente, se usa esa función analítica para establecer la variable que se introducirá para que la velocidad del pistón cambie con respecto a su movimiento (Figura 52).

Parámetros

Etiqueta:

▼ Parámetros

Nombre	Expresión	Valor	Descripción
t	0 [s]	0 s	tiempo para el estudio estacionario
Vp	-1.22[m/s]	-1.22 m/s	Velocidad maxima del Piston
f	4[Hz]	4 Hz	Frecuencia

Figura 50. Parámetros de la Simulación, Etapa de Carga.
Fuente: El Atrache y Vázquez. (2020).

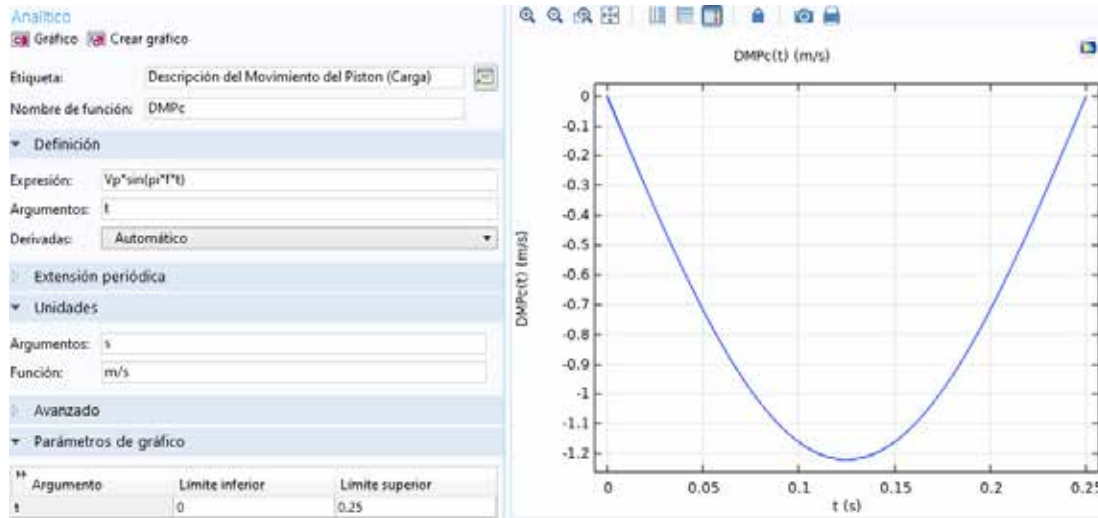


Figura 51. Función Analítica del Movimiento del Pistón, Etapa de Carga.
Fuente: El Atrache y Vázquez. (2020).

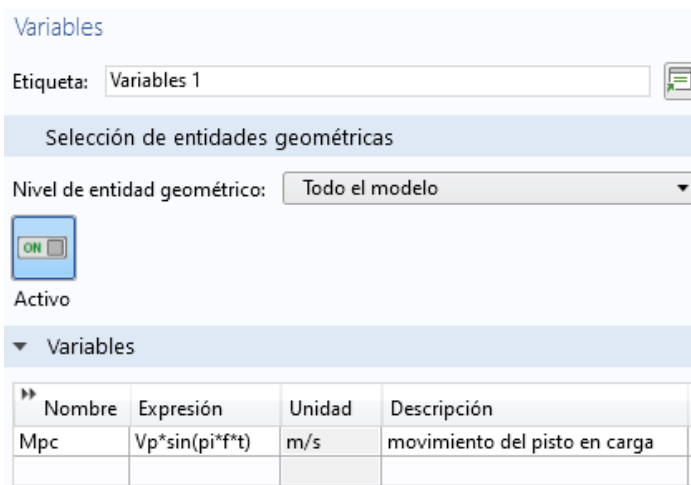


Figura 52. Variable que Describe la Velocidad del Pistón, Etapa de Carga.
Fuente: El Atrache y Vázquez. (2020).

4.4.2.3 Dominio, Propiedades y Condiciones de Contorno

En este momento fue donde se establecen las condiciones que constituyen el estudio de CFD. Primero, se seleccionó el dominio fluidizado como toda la geometría y se introdujeron las propiedades del fluido viscoelástico seleccionado (Figura 13 y Sección 4.1). Se llevaron a unidades internacionales, el valor de consistencia k (m en

COMSOL) a $k = 6,90827 \left(\frac{Kg}{m \cdot s} \right)$, la densidad del fluido a $\rho = 1042,49 \left(\frac{kg}{m^3} \right)$ y el esfuerzo inicial (τ_y , en COMSOL) a $\tau_0 = 281,05661 \left(\frac{N}{m^2} \right)$. También, se probaron valores del parámetro de regularización m (m_p , en COMSOL) de 1, 10, 100 y 1000. Siendo $m = 10$ el más acertado con respecto al modelo (Figura 43).

Ajustes

Propiedades de fluidos

▼ Propiedades de fluidos

Densidad:

ρ Definido por el usuario

1042.49 kg/m³

Viscosidad dinámica:

μ Non-Newtonian model

Non-Newtonian model:

Herschel-Bulkley-Papanastasiou model

$$\mu = \frac{\tau_y}{\dot{\gamma}} \left[1 - \exp(-m_p \dot{\gamma}) \right] + m (\dot{\gamma})^{n-1}$$

$$\dot{\gamma} = \sqrt{2 \mathbf{S} : \mathbf{S}}, \quad \mathbf{S} = \frac{1}{2} \left[\nabla \mathbf{u}_{\text{fluid}} + (\nabla \mathbf{u}_{\text{fluid}})^T \right]$$

Coefficiente de consistencia de fluido:

m 6.90827 kg/(m·s)

Índice de comportamiento de flujo:

n 0.411 1

esfuerzo de fluencia:

τ_y 281.05661 N/m²

Parámetro del modelo:

m_p 10 s

Figura 53. Propiedades y Ecuaciones del Fluido de Perforación Viscoelástico.

Fuente: El Atrache y Vázquez. (2020).

La primera condición de contorno que se introduce es la de las paredes físicas del dominio en donde solo se establece una condición de no deslizamiento (Figura 54). Luego, se selecciona la pared que se le dará la condición de representar la cara del pistón moviéndose y que se le asignará la variable de la velocidad del pistón a lo largo del proceso de carga (Figura 55).

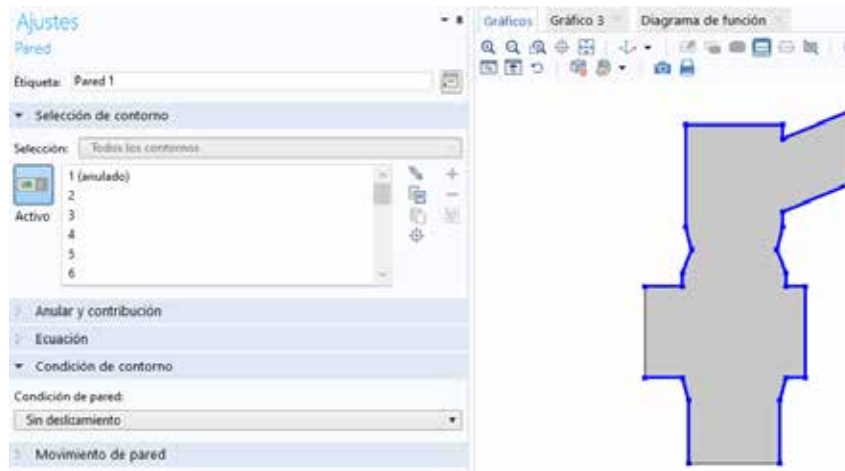


Figura 54. Paredes Fijas, Etapa de Carga.
Fuente: El Atrache y Vázquez. (2020).

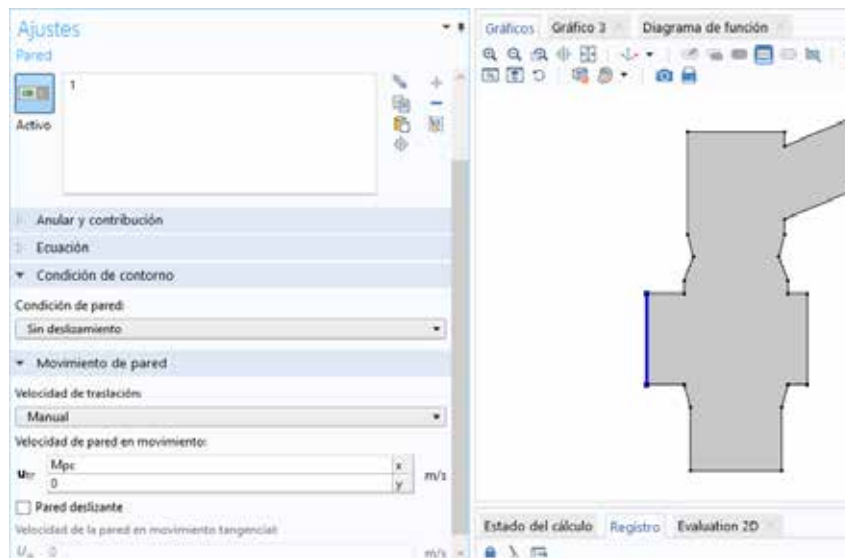


Figura 55. Pared Móvil, Etapa de Carga.
Fuente: El Atrache y Vázquez. (2020).

Después de colocar las paredes, se colocan la entrada (inlet) y la salida (outlet) del sistema que corresponden con la entrada y salida de la cámara de flujo. Para simular la etapa de carga, se necesita emular el hecho de que la válvula de descarga está cerrada durante este intervalo de tiempo (0 a 0,25s), esto se logra colocando la velocidad en la salida como 0 m/s (Figura 56).

La presión en la entrada se sustrae del hecho de que el fluido en su camino hacia la succión proviene de un tanque de almacenamiento en donde se guarda el fluido de perforación después de pasar por la etapa de remoción de recortes. Si, se toman en cuenta las propiedades del fluido y las alturas nominales de esos tanques se tiene una presión promedio de 3 (atm) o 303975 (Pa) (Figura 57). También, se habilito la opción de suprimir reflujo para evitar recirculación, además, se da la dirección unitaria al flujo para ayudar a la convergencia de la solución.

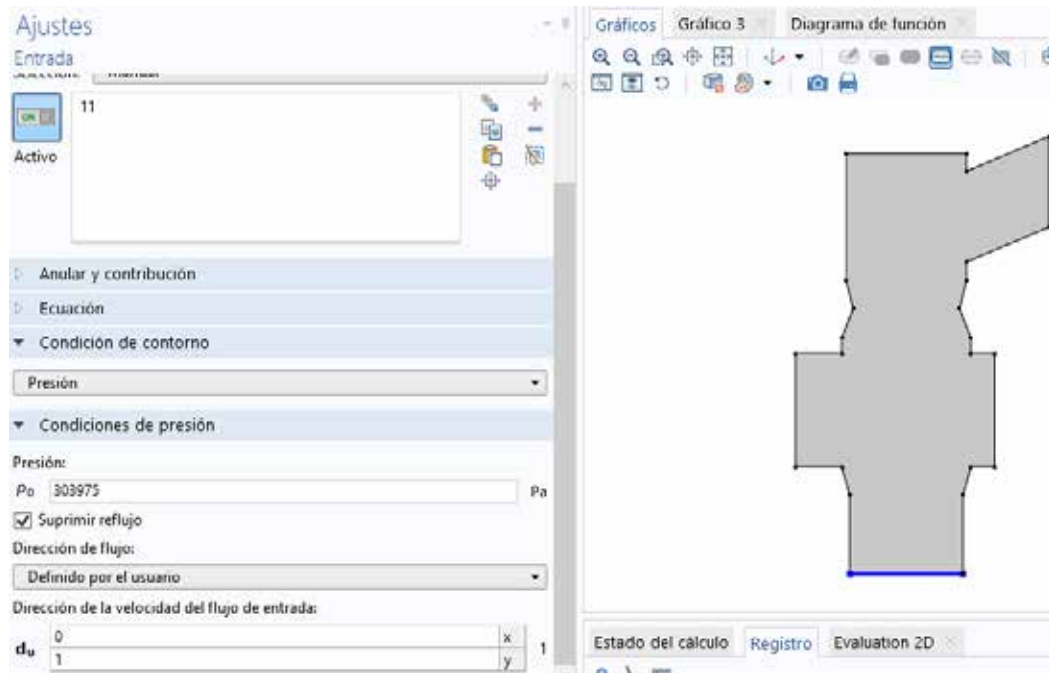


Figura 56. Condición de Entrada (Inlet), Etapa de Carga.
Fuente: El Atrache y Vázquez. (2020).

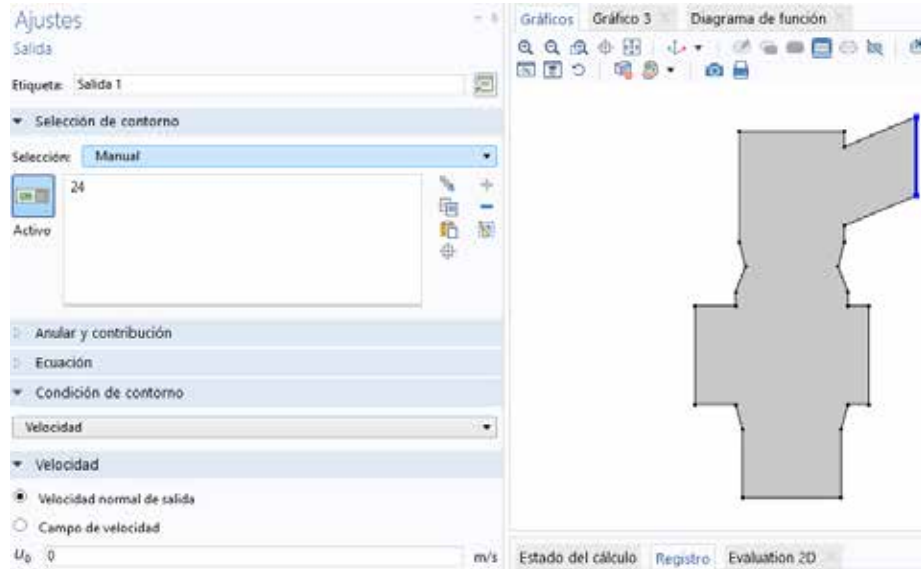


Figura 57. Condición de Salida (Outlet), Etapa de Carga.
Fuente: El Atrache y Vázquez. (2020).

4.4.2.4 Mallado del Modelo

Todos los ajustes de malla se seleccionan para que sean controlados de forma automática por el tipo de física (CFD) seleccionada, cambiando solo el tamaño de malla. Se usa un mallado “extremadamente fino” para asegurar la convergencia y los resultados más precisos posibles (Figura 58).

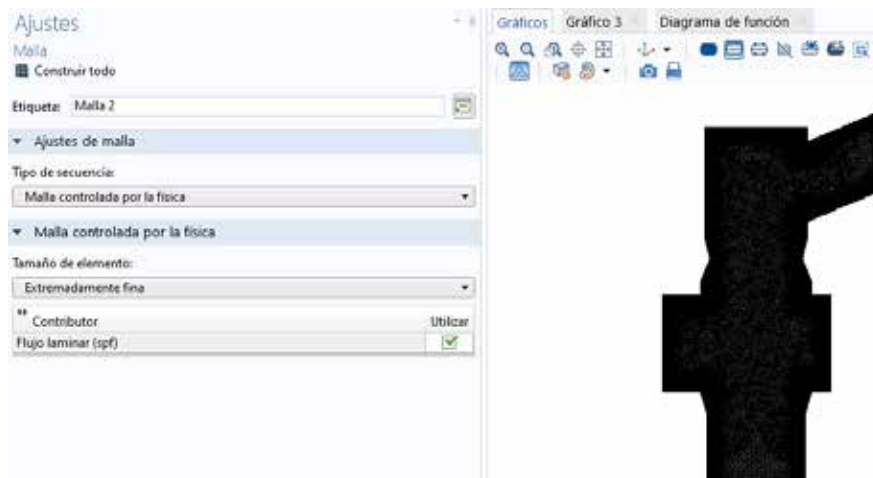


Figura 58. Mallado, Etapa de Carga.
Fuente: El Atrache y Vázquez. (2020).

4.4.2.5 Configuración del Estudio Estacionario.

El solver (solucionador), Segregados, tolerancia y todos los parámetros del estudio se seleccionan para que sean establecidos de forma automática por la física (CFD). Para facilitar la convergencia y poder evaluar las variables dinámicas en distintos instantes de tiempo se selecciona la opción de barrido auxiliar, aquí se selecciona que la variable tiempo se evalúe desde 0,01 hasta 0,25s con un paso de 0,02s, es decir, obtendremos valores de las variables dentro del intervalo cada 0,02s. Se empieza el estudio desde el tiempo 0,01s para evitar errores de convergencia, destacando que justo en ese instante la válvula de carga está cerrada y el pistón tiene velocidad 0 m/s por lo que se desprecia ese instante de tiempo del estudio.

Ajustes
Estacionario
= Calcular Actualizar solución

Etiqueta: Estacionario

Configuración del estudio

Resultados mientras resuelve

Selección de físicas y variables

Modificar configuración de modelo para paso de estudio

Interfaz física	Resuelve para	Discretización
Flujo laminar (spf)	<input checked="" type="checkbox"/>	Ajustes de la física

Valores de variables dependiente

Selección de mallas

Adaptación y estimación de error

Extensiones del estudio

Barrido auxiliar

Tipo de barrido: Todas las combinaciones

Nombre de parán	Lista de valores de parámetros	Unidad de los parái
t (tiempo par:)	range(0.1,0.02,0.25)	s

Figura 59. Configuración del Estudio, Etapa de Carga.

Fuente: El Atrache y Vázquez. (2020).

4.4.3 Simulación de la Etapa de Descarga

El estudio de la descarga consiste en estudiar el pistón en el intervalo que va desde la posición más cercana con respecto al Power End, es decir, al principio de una carrera ($t = 0,25s$, para el estudio) hasta el fin de una carrera o la posición más alejada con respecto al Power End ($t = 0,5s$, para el estudio).

4.4.3.1 Importado de la Geometría

Se utilizó el plano de la sección transversal de la cámara de flujo cuando el pistón está al principio de su carrera (Figura 44) para importar el dominio fluidizado al programa COMSOL Multiphysics y establecerlo como la geometría del componente en el cual se hará la simulación de la etapa de descarga (Figura 60).

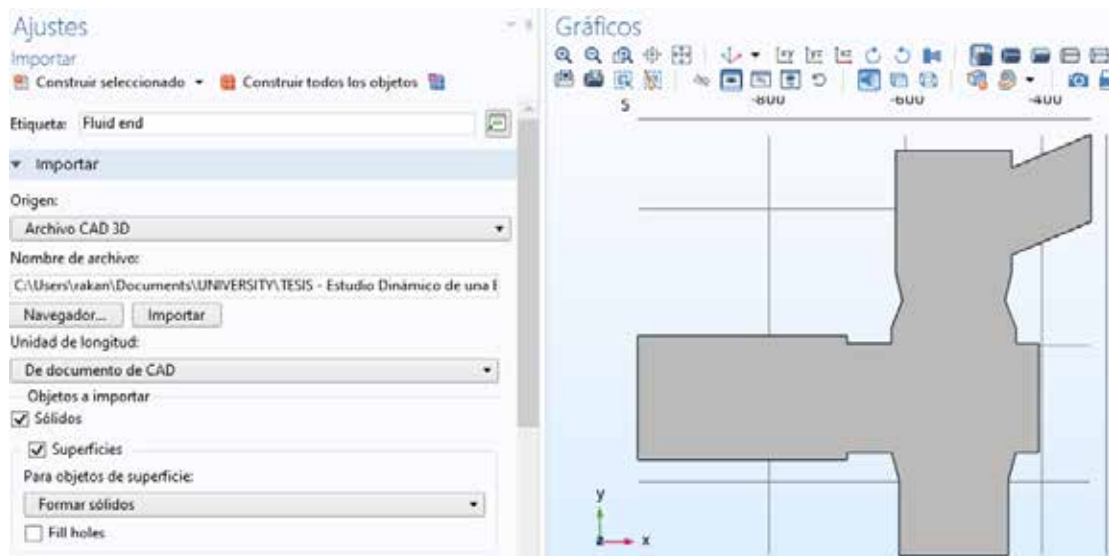


Figura 60. Importado de la Geometría del Dominio Fluidizado, Etapa de Descarga.

Fuente: El Atrache y Vázquez. (2020).

4.4.3.2 Parámetros y Variables de la Etapa de Carga

Se definen las constantes a utilizar en la simulación como parámetros (Figura 61). Luego, se usan esos parámetros para crear una función analítica que describa el movimiento del pistón en la descarga (Figura 62). Finalmente, se usa esa función analítica para establecer la variable que se introducirá para que la velocidad del pistón

cambie con respecto a su movimiento (Figura 63). También, se añade una función escalón (rectángulo) para establecer en que periodos de tiempo la velocidad a la entrada debe tener una magnitud distinta de 0 m/s (Figura 64).

Parámetros

Etiqueta: Parámetros 1

▼ Parámetros

Nomb	Expresión	Valor	Descripción
t	0 [s]	0 s	tiempo para el estudio estacionario
t_carga	0.25[s]	0.25 s	tiempo de carga
t_inicio	0 [s]	0 s	tiempo inicial
Vp	1.22 [m/s]	1.22 m/s	velocidad maxima del piston
f	4[Hz]	4 Hz	frecuencia

Figura 61. Parámetros de la Simulación, Etapa de Descarga.
Fuente: El Atrache y Vázquez. (2020).

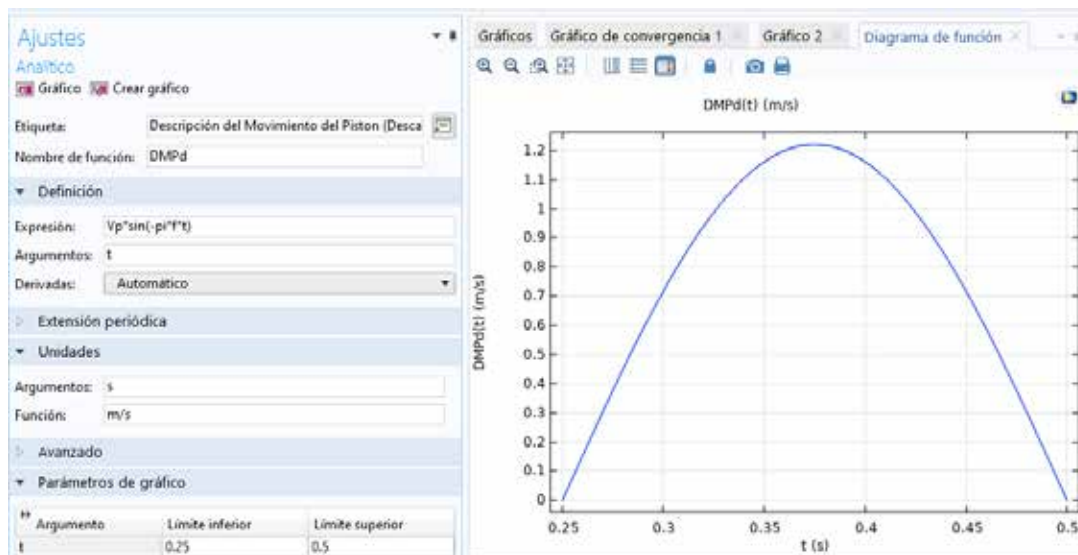


Figura 62. Función Analítica del Movimiento del Pistón, Etapa de Descarga.
Fuente: El Atrache y Vázquez. (2020).

Variables			
Nom	Expresión	Unidad	Descripción
Mpd	$V_p \cdot \sin(-\pi \cdot f \cdot t)$	m/s	movimiento del pistón en la descarga

Figura 63. Variable que Describe la Velocidad del Pistón, Etapa de Descarga.
Fuente: El Atrache y Vázquez. (2020).

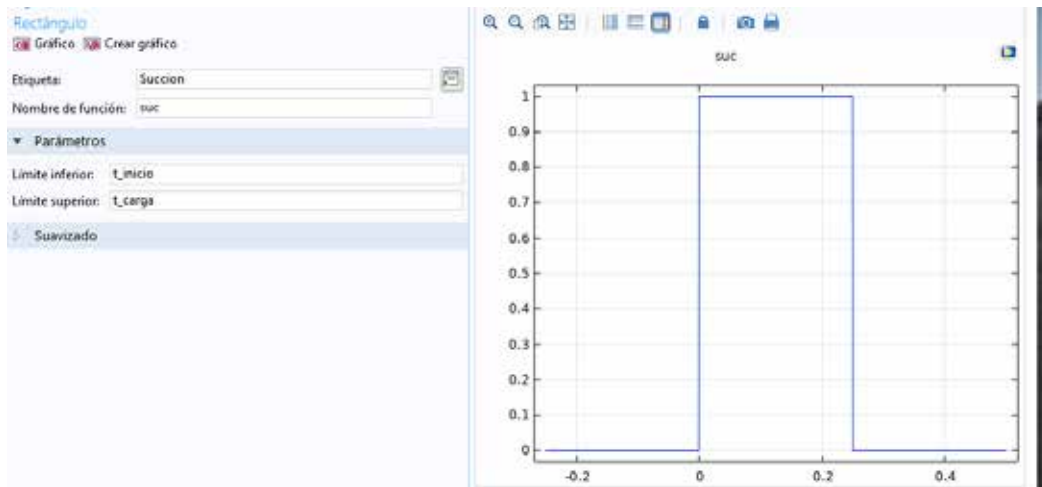


Figura 64. Función Escalón (Rectángulo) para la Succión, Etapa de Descarga.
Fuente: El Atrache y Vázquez. (2020).

4.4.3.3 Dominio, Propiedades y Condiciones de Contorno

Todas las propiedades del fluido son las mismas establecidas para el estudio en la etapa de carga, incluyendo el parámetro de regularización (m) (Figura 53).

La primera condición de contorno que se introduce es la de las paredes físicas del dominio en donde solo se establece una condición de no deslizamiento (Figura 65). Luego, se selecciona la pared que se le dará la condición de representar la cara del pistón moviéndose y que se le asignará la variable de la velocidad del pistón a lo largo del proceso de descarga (Figura 66). Por último, se seleccionan las paredes por las cuales están en contacto con la pared móvil al desplazarse para que permitan el deslizamiento (Figura 67)

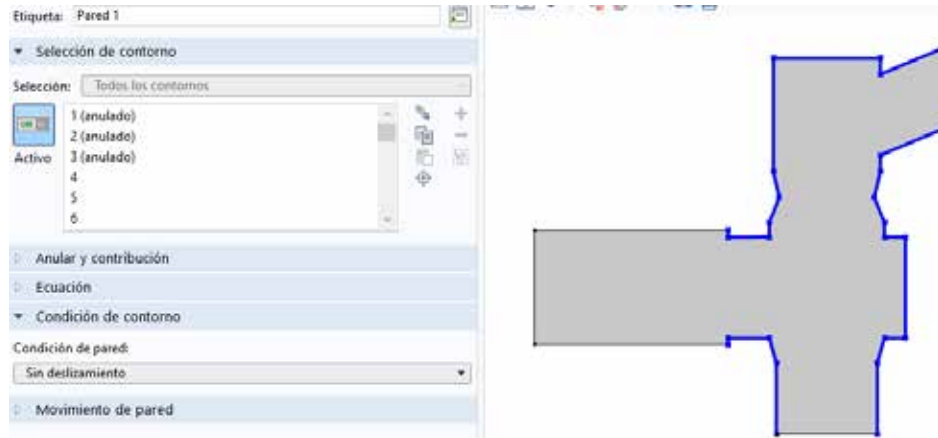


Figura 65. Paredes Fijas, Etapa de Descarga.
Fuente: El Atrache y Vázquez. (2020).

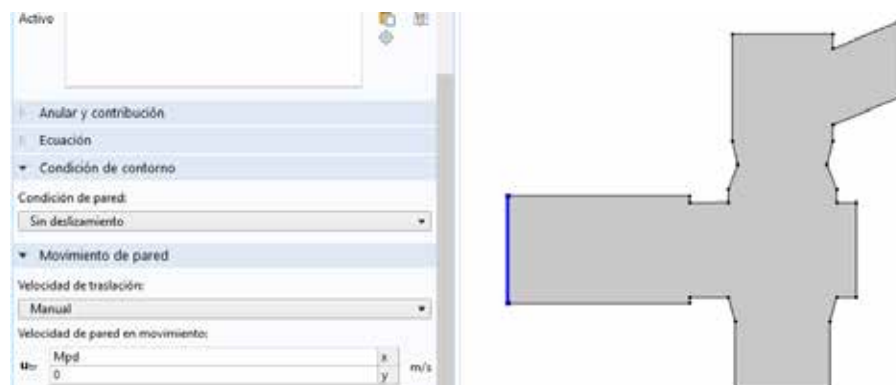


Figura 66. Pared Móvil, Etapa de Descarga.
Fuente: El Atrache y Vázquez. (2020).

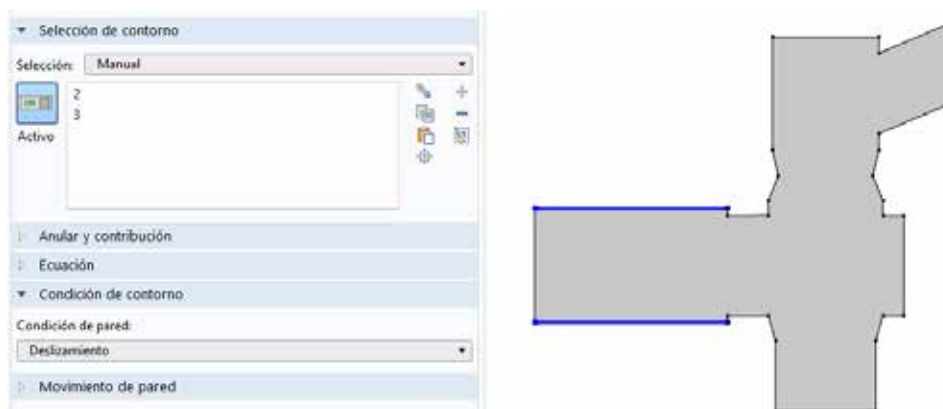


Figura 67. Pared Fija con Condición de Deslizamiento, Etapa de Descarga.
Fuente: El Atrache y Vázquez. (2020).

Después de colocar las paredes, se colocan la entrada (inlet) y la salida (outlet) del sistema que corresponden con la entrada y salida de la cámara de flujo. Para simular la etapa de descarga, se necesita emular el hecho de que la válvula de carga está cerrada durante el intervalo de tiempo de descarga (0,25 a 0,5s). Debido a que primero debe ocurrir la etapa de carga se usa una función escalón (suc) que hace 0 m/s la velocidad en la entrada solo en la etapa de descarga.

Entonces, se selecciona el contorno de entrada se coloca la velocidad calculada de 2,2 m/s utilizando la relación de flujo masico entrada es igual al flujo masico de salida, y se multiplica por la función escalón (Figura 68).

En la condición de salida se utiliza la presión nominal a la salida de la bomba Triplex seleccionada de 3423 Psi (23600000 Pa) (Figura 69).

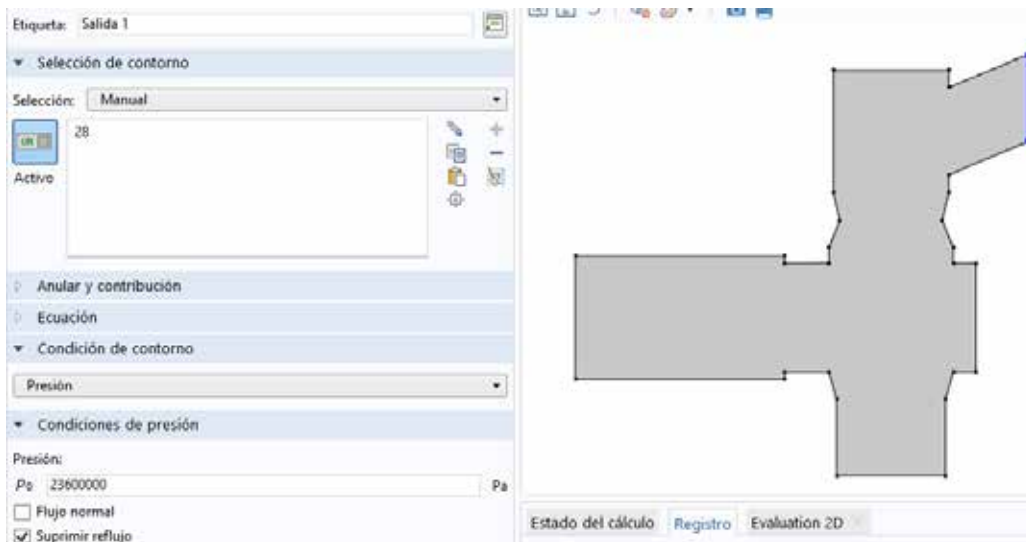


Figura 68. Condición de Salida (Outlet), Etapa de Descarga.

Fuente: El Atrache y Vázquez. (2020).

4.4.3.4 Mallado del Modelo

Todos los ajustes de malla se seleccionan para que sean controlados de forma automática por el tipo de física (CFD) seleccionada, cambiando solo el tamaño de

mallado. Se selecciona un mallado “extremadamente fino” para asegurar la convergencia y los resultados más precisos posibles (Figura 70).

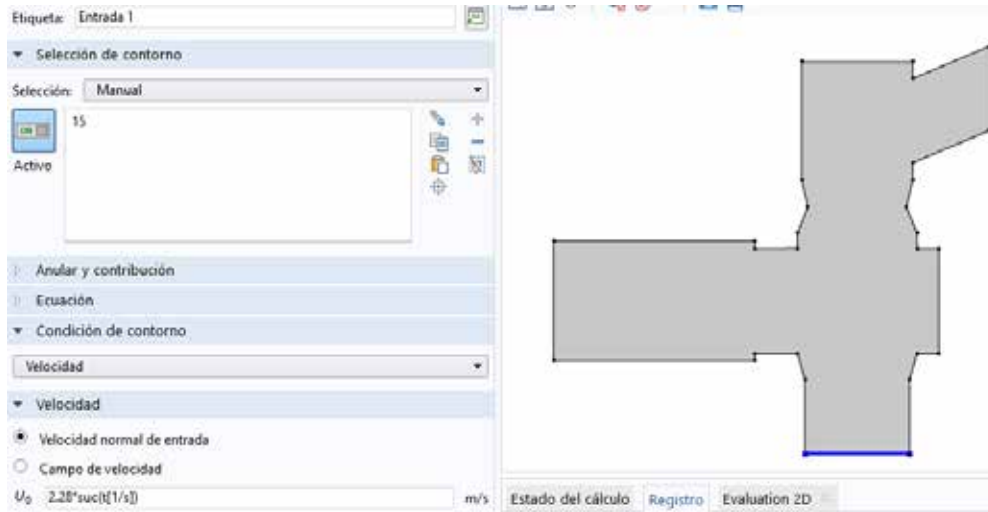


Figura 69. Condición de Entrada (Inlet), Etapa de Descarga.

Fuente: El Atrache y Vázquez. (2020).

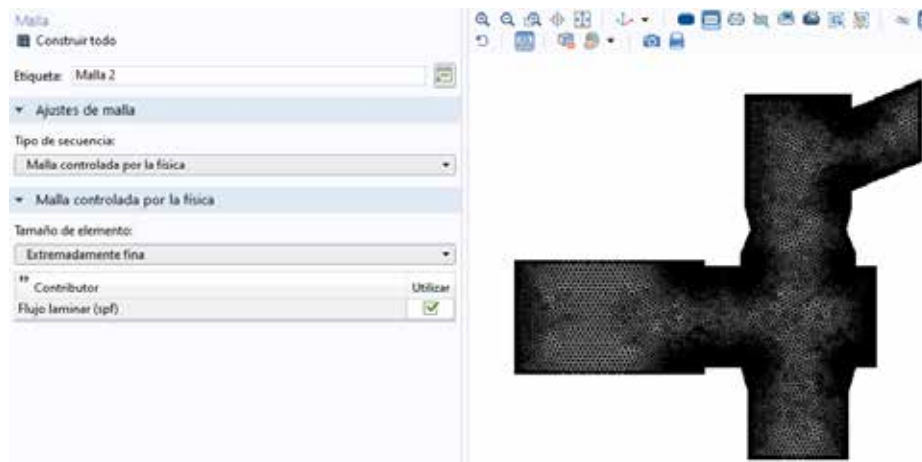


Figura 70. Mallado, Etapa de Descarga.

Fuente: El Atrache y Vázquez. (2020).

4.4.3.5 Configuración del Estudio Estacionario.

El solver (solucionador), Segregados, tolerancia y todos los parámetros del estudio se seleccionan para que sean establecidos de forma automática por la física (CFD). Para facilitar la convergencia y poder evaluar las variables dinámicas en

distintos instantes de tiempo se selecciona la opción de barrido auxiliar, aquí se selecciona que la variable tiempo se evalué desde 0,251 hasta 0,5s por las mismas razones que se expusieron en el estudio de la etapa de carga (Figura 71).

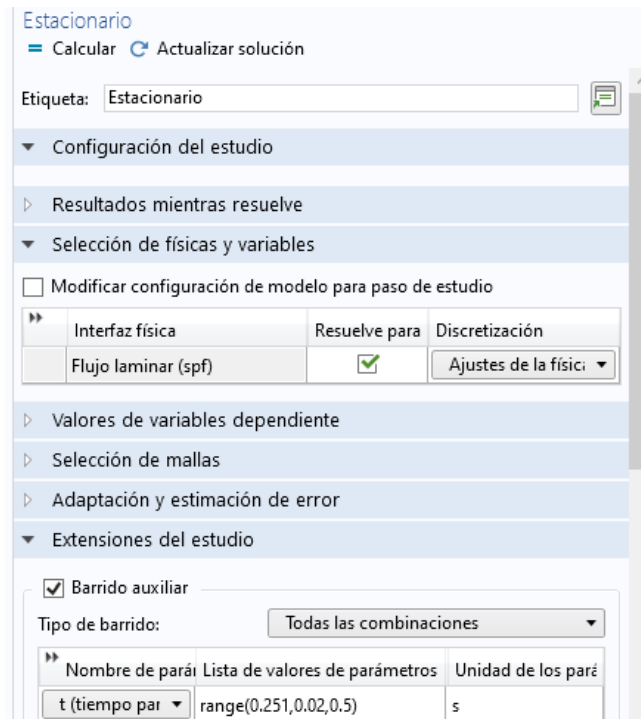
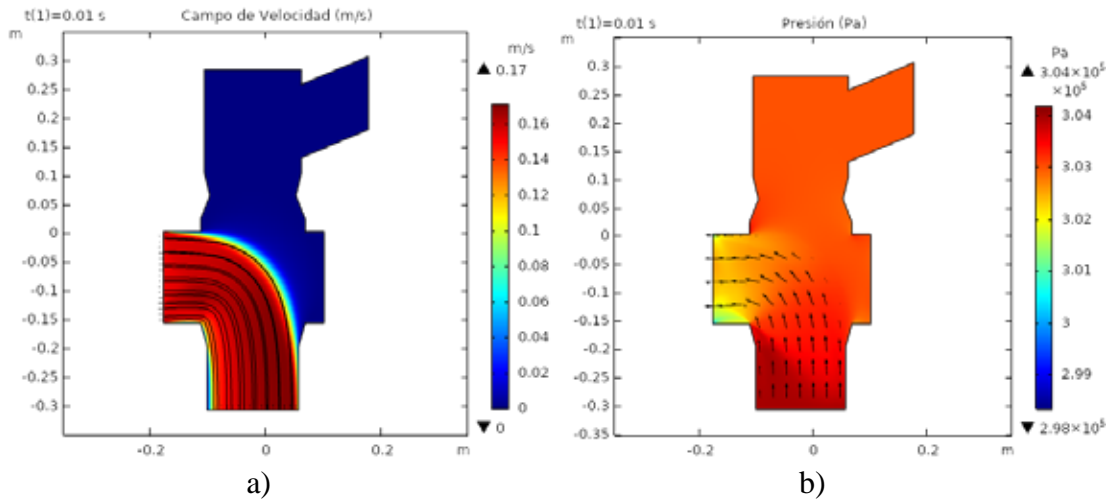


Figura 71. Configuración del Estudio, Etapa de Descarga.
Fuente: El Atrache y Vázquez. (2020).

4.5 Análisis de los resultados obtenidos en la simulación mediante el uso de datos y gráficos.

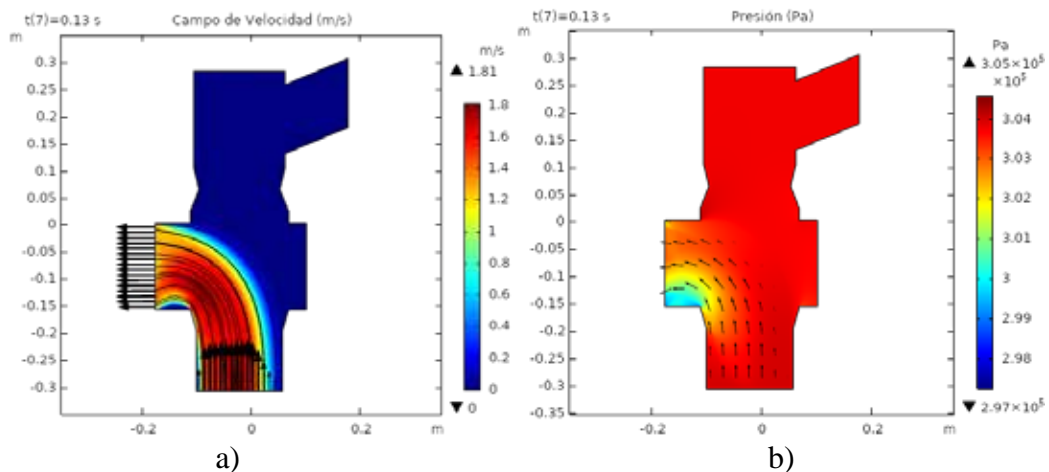
La etapa de carga (0,01s – 0,25s) y la etapa de descarga (0,251s – 0,5s) arrojo como resultado el valor de las variables dinámicas en 13 intervalos de tiempo en cada una de las simulaciones de cada etapa. Se tomaron (dependiendo de la variable) los intervalos más significativos que fueran suficientes para definir el comportamiento dinámico de la etapa en estudio, es decir, se tomaron los intervalos donde los cambios de las magnitudes de las variables de un instante con respecto a un instante anterior eran considerables.

4.5.1 Resultados de la Etapa de Carga



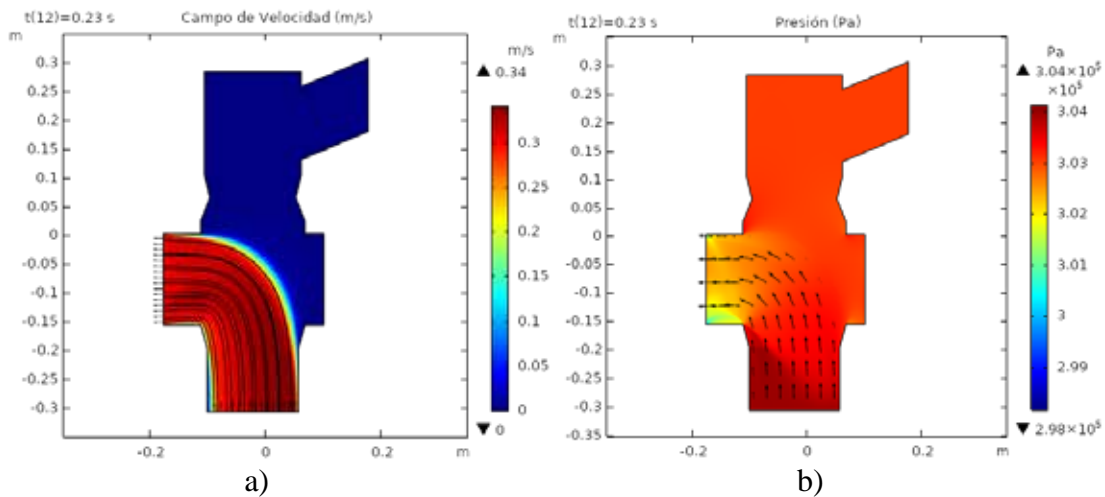
Gráfica 1. Velocidad m/s (a) y Presión Pa (b) en $t = 0,01$ s.
Fuente: El Atrache y Vázquez. (2020).

Lo que se pudo apreciar en este instante (inicio de la carrera de carga del vástago-pistón) por sí solo no es de alta relevancia debe compararse con los instantes siguientes, solo se puede resaltar que la velocidad del fluido es constante por todo el campo de flujo y que su magnitud no es muy elevada, debido a ser el principio de la carrera.



Gráfica 2. Velocidad m/s (a) y Presión Pa (b) en $t = 0,13$ s.
Fuente: El Atrache y Vázquez. (2020).

A partir de este momento el pistón se encuentra a la mitad de la carrera de carga, se evidencia como la velocidad del fluido aumenta precipitadamente con respecto al instante anterior, lo que nos da a entender que la fuerza de succión de la bomba provocada por el movimiento del pistón en este punto está afectando directamente al flujo. Esta fuerza de succión, es la misma que provoca una pequeña disminución de la presión en el segmento cerca a la cara del pistón.

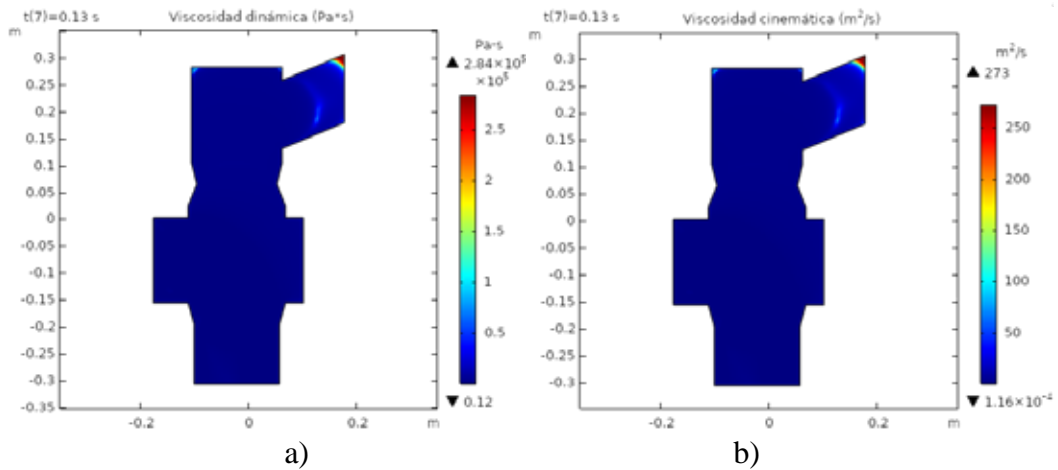


Gráfica 3. Velocidad m/s (a) y Presión Pa (b) en $t = 0,23s$.

Fuente: El Atrache y Vázquez. (2020).

Ahora bien, como era de esperarse justo en el instante cuando el pistón está a punto de culminar su carrera de carga, la velocidad disminuye considerablemente con respecto al instante de tiempo anterior, pero curiosamente sigue siendo el doble de la magnitud de la velocidad con la que inicio el ciclo de carga, cabe destacar que justo después de este instante de tiempo, la válvula de succión se cerrara para dar inicio a la carrera de descarga. Es importante destacar, la recuperación de la presión debido a que el fluido ya ha ingresado en su totalidad a la cámara.

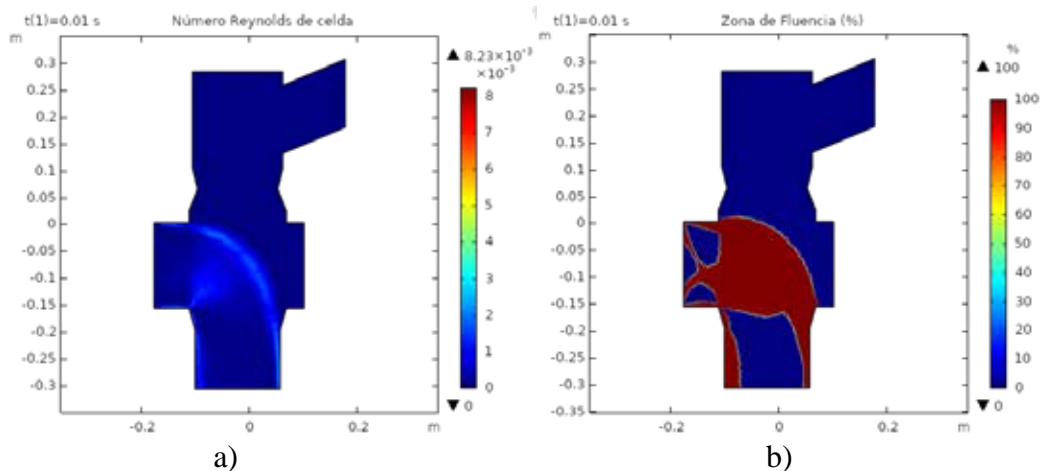
A lo largo de las 3 graficas anteriores también se presentan la dirección del flujo y sus líneas de corriente, demostrando un régimen plenamente laminar y direccionado hacia la cara del pistón.



Gráfica 4. Viscosidad Dinámica Pa. S (a) y Viscosidad Cinemática m^2/s (b) en $t = 0,13s$.

Fuente: El Atrache y Vázquez. (2020).

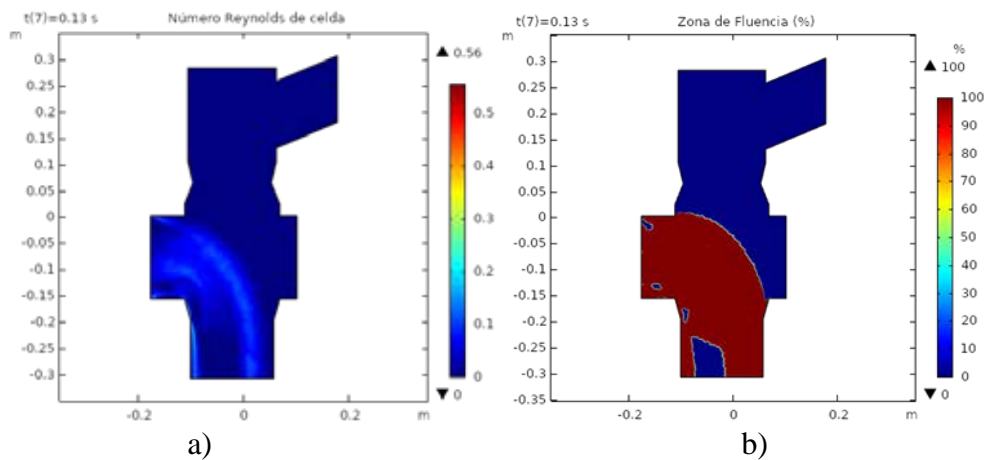
El momento más crítico de la etapa de carga es este instante de tiempo y como el cambio a través del tiempo de la viscosidad dinámica y cinemática es despreciable en esta etapa de carga (demostrado en una invariancia en los intervalos), Estos resultados lo que nos indican es que el fluido poseía un valor bajo de viscosidad que se traduce en una fluidez constante y es consistente con lo que se observó en las gráficas de velocidad.



Gráfica 5. Número de Reynolds de Celda (a) y Zona de Fluencia % (b) en $t = 0,01s$.

Fuente: El Atrache y Vázquez. (2020).

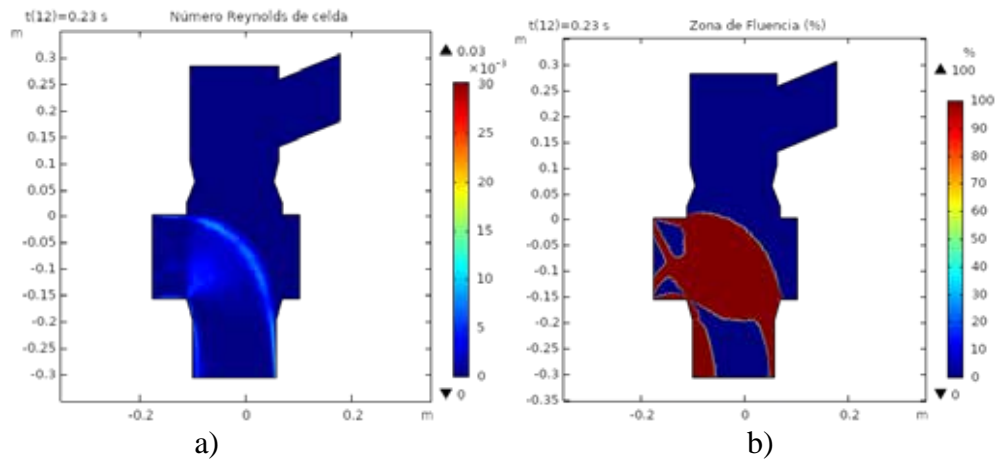
Estudiando el número de Reynolds y de la zona de fluencia en el instante que se inicia la etapa de carga, nos indican primeramente que el fluido posee un régimen de flujo laminar (tendiendo a deslizante) establecido por la presencia de números de Reynolds muy bajos y segundo, que empieza el desarrollo de las zonas de fluencia donde el fluido tiende a deformarse más fácilmente. Las zonas de fluencia para estar en un tiempo tan corto se desarrollan tan rápido debido a la facilidad a fluir bajo esfuerzo de corte pequeños del fluido viscoelástico.



Gráfica 6. Número de Reynolds de Celda (a) y Zona de Fluencia % (b) en $t = 0,13s$.
Fuente: El Atrache y Vázquez. (2020).

En lo que denominamos momento crítico de la carga (se alcanza la velocidad máxima), se puede determinar que, a pesar del incremento del número de Reynolds a lo largo del dominio, el régimen de flujo permanece laminar, aunque si alejándose completamente de un régimen deslizante. Este mismo cambio se traduce en aumento en las zonas de fluencia dado por el aumento de los esfuerzos que debido a la propiedad viscoelástica se traducen en más facilidad para fluir.

Se empieza a notar la correspondencia entre el número de Reynolds y las zonas de fluencia, estableciendo que, a mayor Reynolds, mayor facilidad para fluir debido a la reducción de la viscosidad, es decir, mayores zonas de fluencia.



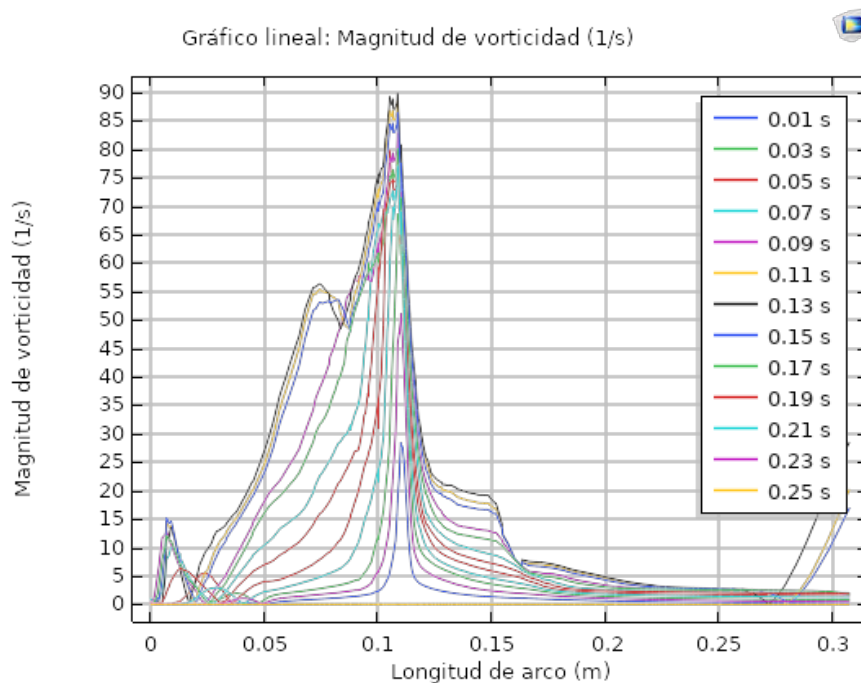
Gráfica 7. Número de Reynolds de Celda (a) y Zona de Fluencia % (b) en $t = 0,23s$.
Fuente: El Atrache y Vázquez. (2020).

Similar al inicio de la carrera de carga, el número de Reynold ha disminuido, aunque un poco más bajo por el hecho de alcanzar velocidad nula en la cara del pistón al chocar. Se confirma la relación de Reynolds-Zona de Fluencia, ya que este mismo final de carrera donde el flujo choca con la cara del pistón, reduce abruptamente el flujo cercano y causa esas disminuciones en la facilidad para fluir. Es importante destacar que esta correspondencia viene dada por la característica de los viscoelásticos de recuperar parte de su estado anterior si se detiene el esfuerzo en un punto.



Gráfica 8. Tasa de Cizalladura (Deformación) vs Viscosidad Dinámica, Carga.
Fuente: El Atrache y Vázquez. (2020).

Es evidente, el pleno comportamiento no newtoniano y viscoelástico del fluido, que como lo explica la teoría, a través del tiempo en todos los instantes a través de la geometría de la bomba, en donde mayor fue la tasa de deformación que está experimentando el flujo menor fue la viscosidad del fluido. Cabe destacar, que la linealidad aparente en la gráfica se debe al parámetro de regularización de Papanastasiou (m) que se encuentra en las fórmulas de viscosidad para poder alcanzar la convergencia, es decir, realmente esta relación tiende a ser menos lineal.

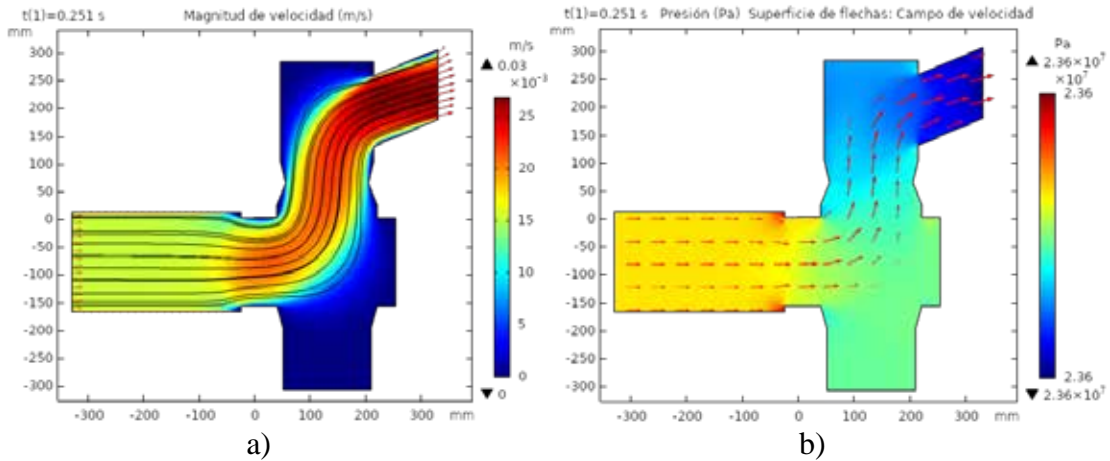


Gráfica 9. Magnitud de Vorticidad, Carga.

Fuente: El Atrache y Vázquez. (2020)

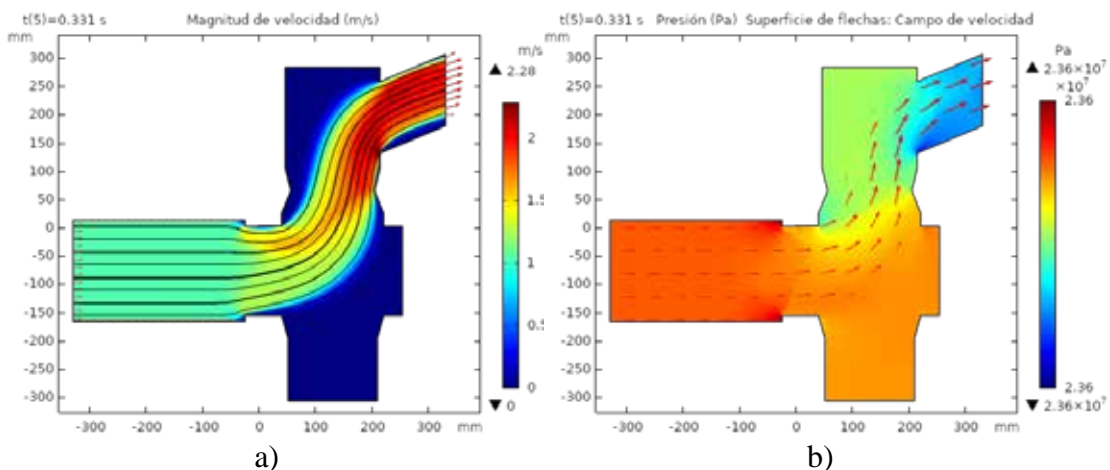
La longitud de arco expresada es una línea que atraviesa toda geometría por la cual circula el flujo en esta etapa. Entonces, si analizamos todos los instantes de tiempo nos damos cuenta que el efecto rotacional del flujo alcanza su valor máximo cada vez que cruza desde la succión hacia la cámara del pistón, destacando que en el instante de tiempo cuando el efecto del desplazamiento del pistón es mayor se alcanza la máxima vorticidad.

4.5.2 Resultados de la Etapa de Descarga



Gráfica 10. Velocidad m/s (a) y Presión Pa (b) en $t = 0,251$ s.
Fuente: El Atrache y Vázquez. (2020).

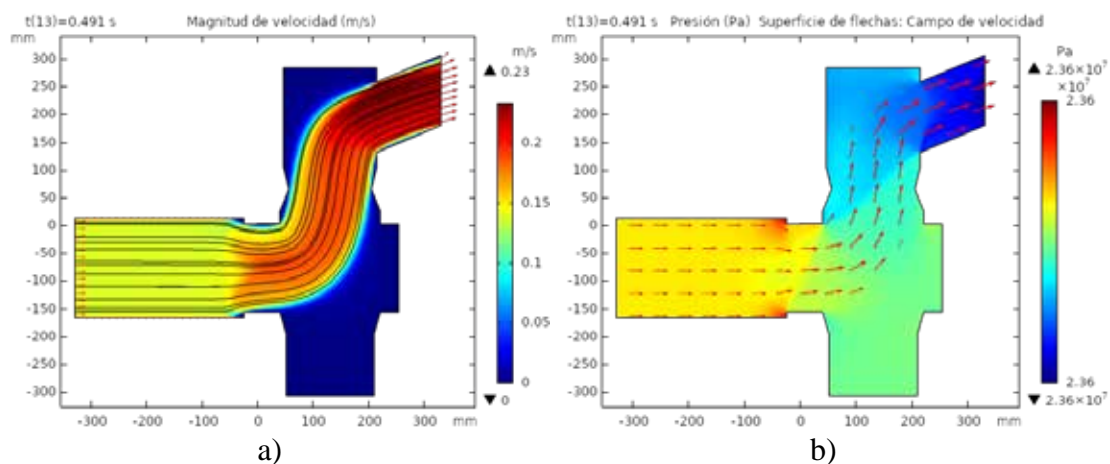
Al momento del inicio de la carrera de descarga el fluido que se encuentra dentro de la cámara de flujo por un pequeño instante de tiempo se encuentra casi inmóvil pues la condición viscoelástica del fluido se presenta, este tiende a volver a su condición de pseudosólido y posee una gran cantidad de energía acumulada reflejada en una alta presión y velocidad muy baja.



Gráfica 11. Velocidad m/s (a) y Presión Pa (b) en $t = 0,331$ s.
Fuente: El Atrache y Vázquez. (2020).

Una vez que el pistón ha recorrido la mitad de su carrera se observó que el fluido alcanza la velocidad de salida o descarga máxima, debido al estrechamiento del campo de velocidad como lo describe la Grafica (11-b), influyendo nuevamente las propiedades viscoelásticas del fluido que al estar sometido a tasas de corte elevadas y aumenta su fluidez (disminuye su viscosidad), además se puede agregar que existe una zona de roce critica dentro de la cámara donde se debe considerar el efecto erosivo del flujo, para un posible diseño.

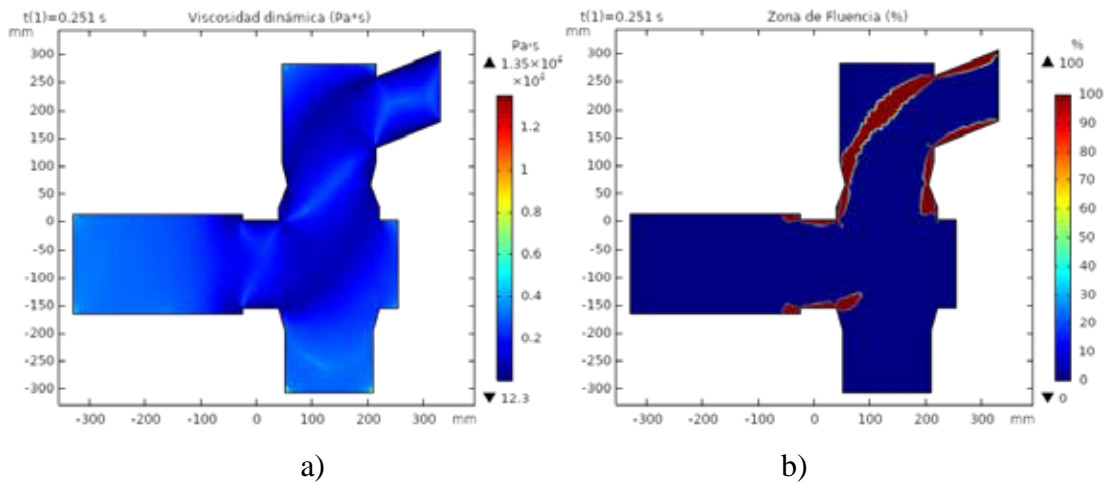
Como es de esperarse al aumentar la velocidad del flujo en la etapa de descarga, existe un aumento en la presión en las zonas donde se aglomera el flujo para salir por la tubería de descarga.



Gráfica 12. Velocidad m/s (a) y Presión Pa (b) en $t = 0,491s$.

Fuente: El Atrache y Vázquez. (2020).

Por último, cuando el pistón está próximo a terminar su carrera, se puede observar una disminución considerable en la velocidad de salida del fluido con respecto al instante anterior, nuevamente demostrando un comportamiento viscoelástico, con lo que se puede concluir que el comportamiento viscoelástico ofrece al fluido la facultad de regresar a un estado pseudosólido rápidamente, pero al aplicarle esfuerzos no tan elevados, este fluye de manera muy rápida, propiedad por la cual se vuelve tan necesario y efectivo su uso en la perforación de pozos petroleros.

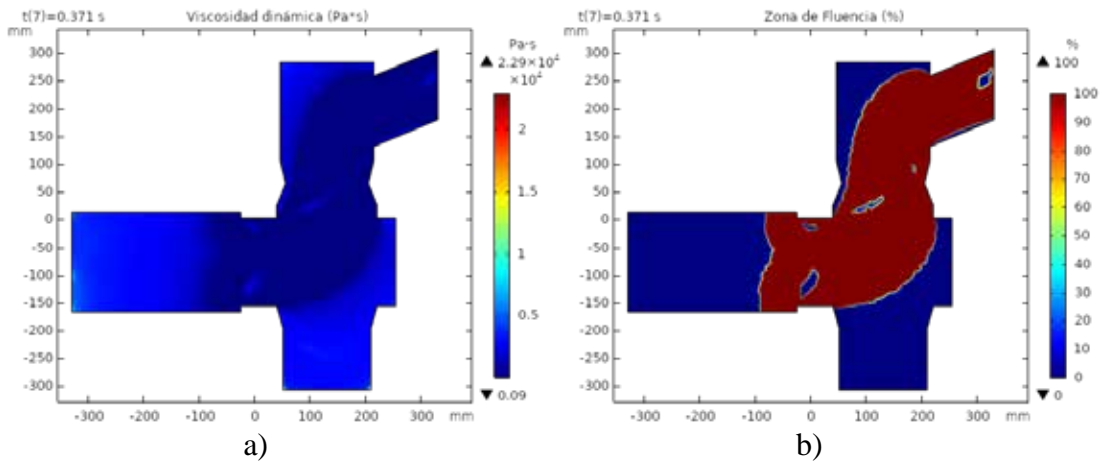


Gráfica 13. Viscosidad Dinámica Pa. s (a) y Zona de Fluencia % (b) en $t = 0,251s$.
Fuente: El Atrache y Vázquez. (2020).

A diferencia de la etapa de carga, en la descarga se colocó la correspondencia inversa entre la viscosidad dinámica y las zonas de fluencia, es decir, por ser un viscoelástico a mayor viscosidad habrá menos flujo, por lo tanto, menores zonas de fluencia y viceversa. Al inicio del movimiento, por ser pequeño el esfuerzo aplicado, el fluido rápidamente sufre un aumento de su viscosidad dinámica, provocando una resistencia a la fluencia que se traduce en zonas de fluencia de 0%.

Otra de las cosas observables, es que un posible aumento en la turbulencia del flujo puede inducirse en las zonas en donde la viscosidad se encuentra en decaimiento; tomando en cuenta que el fluido desplazado es un viscoelástico, la aparición de este régimen puede darse muy rápido mientras la aplicación del esfuerzo ejercido por la bomba aumenta, y esto podemos observarlos en el grafico siguiente.

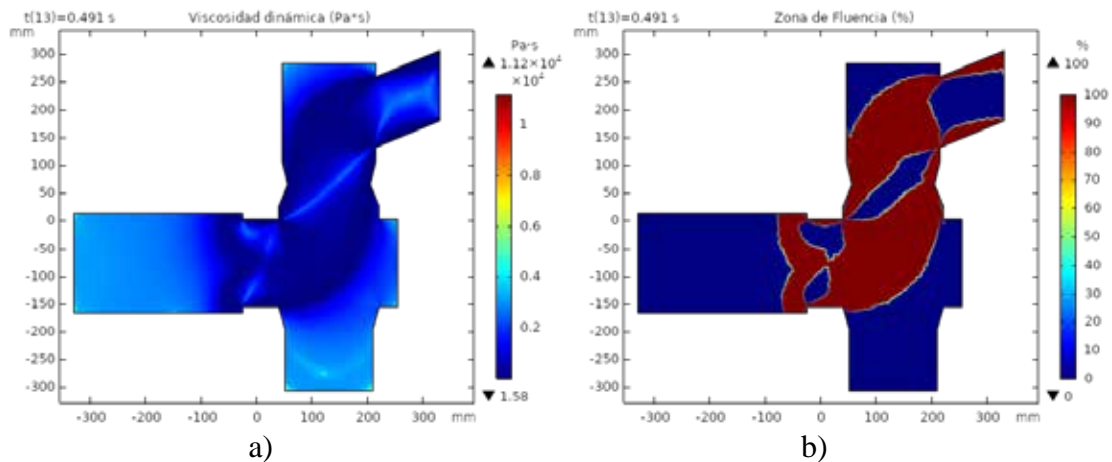
Cabe destacar, que en todo momento la zona de fluencia tuvo correspondencia con el número de Reynolds en la descarga, por razones ya expresadas en la etapa de carga, por lo tanto, la viscoelasticidad también permite establecer una relación donde la viscosidad dinámica será mayor a menores números de Reynold.



Gráfica 14. Viscosidad Dinámica Pa. s (a) y Zona de Fluencia % (b) en $t = 0,371s$.

Fuente: El Atrache y Vázquez. (2020).

En medio de la carrera del pistón de la bomba, se observa un crecimiento de las zonas de fluencias del flujo en donde la viscosidad dinámica ha disminuido, observándose la coincidencia de las zonas en donde ocurre este fenómeno de la relación fluencia-viscosidad. En consecuencia, como se observó en este mismo intervalo en la gráfica de velocidad, se aprecia un incremento considerable de la velocidad del flujo. Todo confirmado por la propiedad viscoelástica del fluido

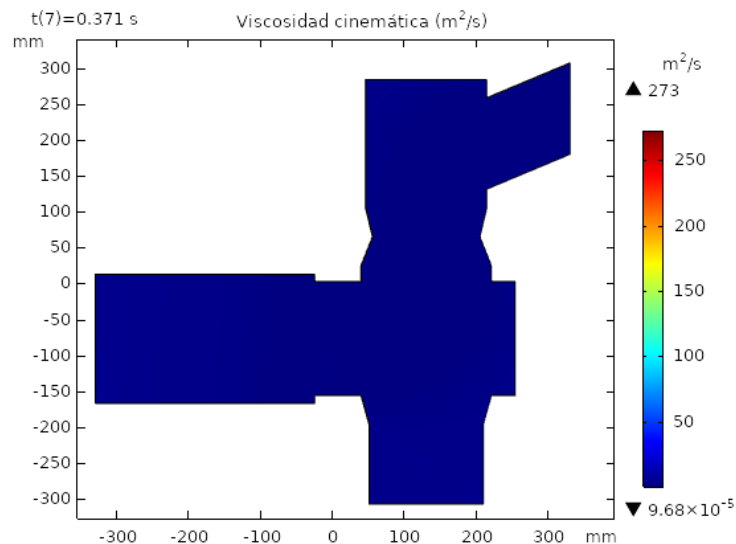


Gráfica 15. Viscosidad Dinámica Pa. s (a) y Zona de Fluencia % (b) en $t = 0,491s$.

Fuente: El Atrache y Vázquez. (2020).

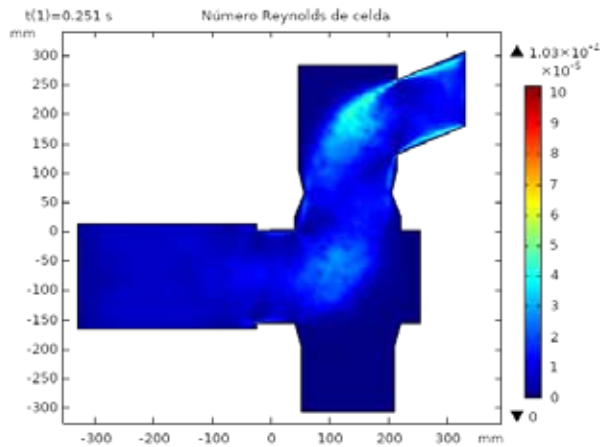
Sin embargo, en la gráfica 15, una vez que va disminuyendo el esfuerzo aplicado por la bomba, se puede observar como las zonas de fluencia desaparecen, destacando nuevamente un regreso del fluido a sus condiciones iniciales pseudosolidas. A medida que los esfuerzos disminuyen, la viscosidad aumenta, y la fluencia disminuye, por lo que, en este instante de tiempo, el desplazamiento del flujo podría convertirse un poco más difícil de mover con respecto a condiciones de instantes anteriores.

En este mismo sentido, la fluencia se mantiene en las zonas cercanas a los bordes, son de los esfuerzos se mantienen un poco mayor con respecto al centro del flujo. Esto, con relación a la velocidad, ejerce una influencia en una caída de la misma de manera abrupta y no progresiva.



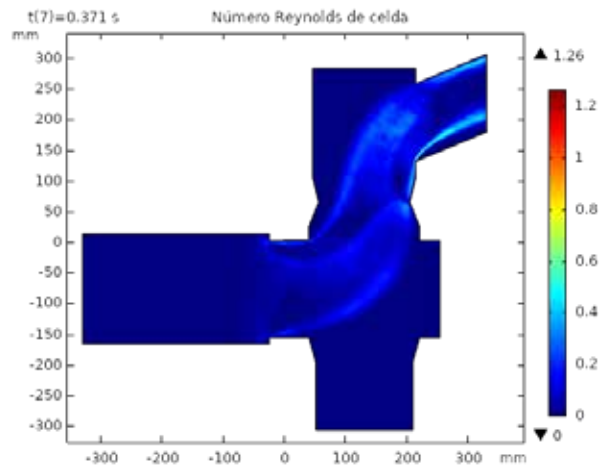
Gráfica 16. Viscosidad Cinemática m^2/s en $t = 0,371s$.
Fuente: El Atrache y Vázquez. (2020).

Solo se muestra un grafica de viscosidad cinemática, porque en todos los intervalos de tiempo esta fue constante, explicándose, que esto ocurre a la incompresibilidad del fluido y las altas tasas de corte que disminuyen la viscosidad a un punto mínimo.



Gráfica 17. Número de Reynolds de Celda en $t = 0,251s$.
Fuente: El Atrache y Vázquez. (2020).

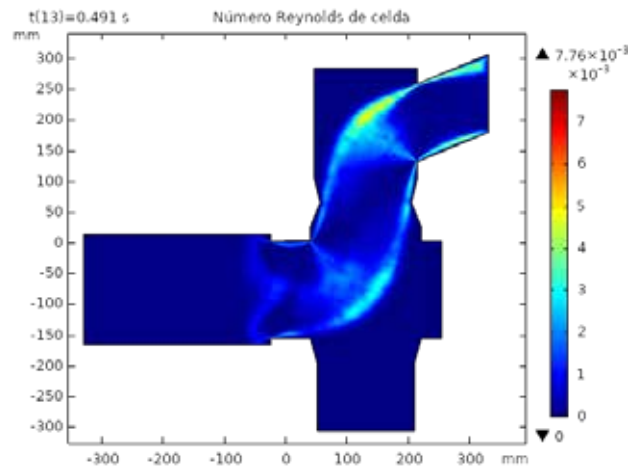
En el momento de iniciar el movimiento del pistón en la descarga, se puede observar un incremento del número de Reynolds, propiciado un posible cambio de régimen en las zonas en donde se muestra, como se había mencionado anteriormente.



Gráfica 18. Número de Reynolds de Celda en $t = 0,371s$.
Fuente: El Atrache y Vázquez. (2020).

Y una vez que el pistón alcanza sus velocidades máximas, se puede observar un incremento del número de Reynolds con respecto al estado anterior, por lo que se puede concluir un posible aumento en la vorticidad con respecto al estado previo del flujo.

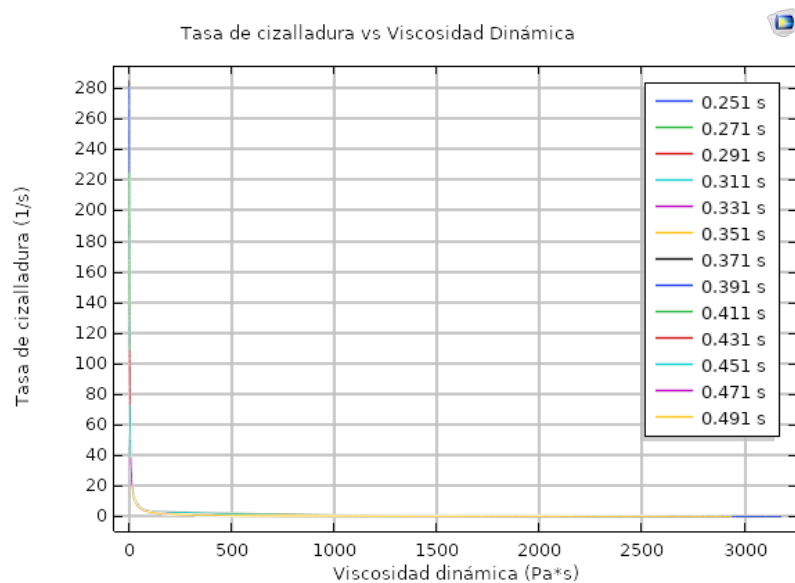
Esto convierte, a este instante en el más crítico del flujo y de la bomba, por lo que se puede considerar dentro de un posible estudio de diseño, como uno de los puntos más críticos a estudiar y considerar.



Gráfica 19. Número de Reynolds de Celda en $t = 0,491s$.

Fuente: El Atrache y Vázquez. (2020).

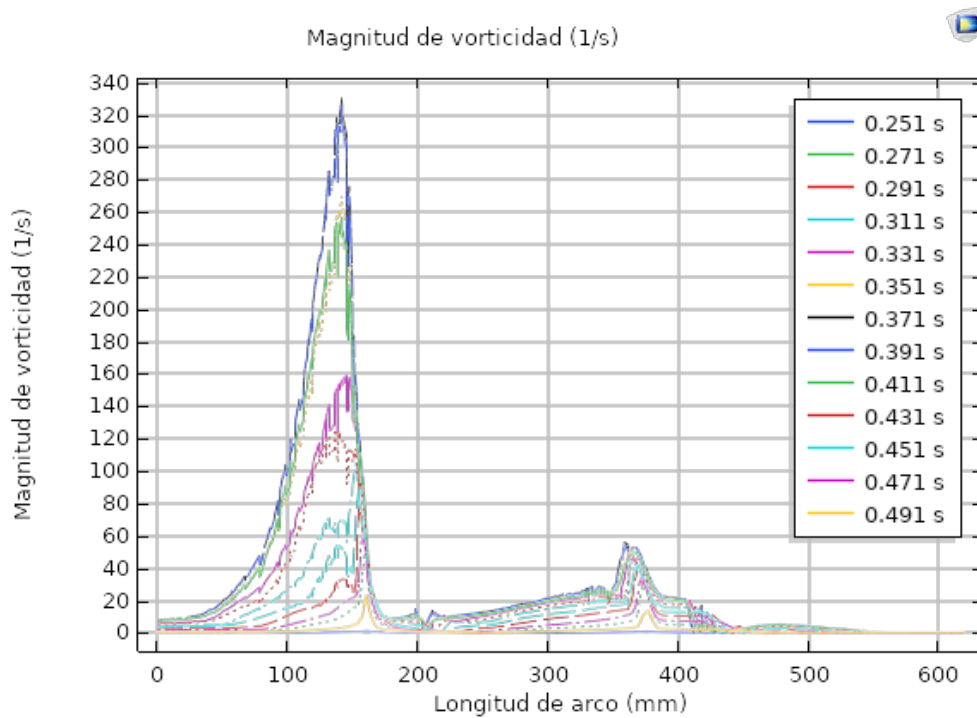
Ya al final de la carrera se observa una nueva disminución del número de Reynolds asociada al decremento que sufre la velocidad del fluido.



Gráfica 20. Tasa de Cizalladura (Deformación) vs Viscosidad Dinámica, Descarga.

Fuente: El Atrache y Vázquez. (2020).

Al igual que en la etapa de carga, esta grafica es la encargada de confirmar el comportamiento no newtoniano viscoelástico, un poco más lineal que en la etapa de carga, se debe al hecho de tasas de corte mayores y por lo tanto una disminución más grande en la viscosidad a nivel general.



Gráfica 21. Magnitud de Vorticidad, Descarga.

Fuente: El Atrache y Vázquez. (2020).

La longitud expresada ahora atraviesa la geometría en la etapa de descarga y al igual que en la etapa de carga, los valores picos de vorticidad se encuentran en el lugar donde el flujo pasa de la cámara del pistón a la descarga. Ahora bien, se observa un aumento considerable en los valores de vorticidad con respecto a la etapa anterior, esto se asocia directamente a un número de Reynolds mayor y una disminución de los efectos viscosos en el fluido a causa de la propiedad de adelgazamiento por cizalladura del fluido de perforación.

CONCLUSIONES

- Las propiedades y las condiciones de modelo seleccionadas para modelar el fluido de perforación viscoelástico pudieron describir correctamente el comportamiento del flujo en el caso de estudio, esto debido a que son las principales propiedades que definen a un campo de flujo incompresible y no newtoniano del tipo viscoelástico.
- Las ecuaciones de gobierno seleccionadas en la herramienta computacional convergieron a un resultado aceptable desde el punto de vista teórico, por lo que se concluye que el diseño CAD de la bomba Triplex seleccionada y la solución numérica son compatibles, evitando errores en la simulación que son producidos por las inestabilidades numéricas y errores en la selección del modelo matemático.
- El modelado físico matemático consistió en la selección del flujo en estado estacionario, adiabático, cuyo flujo fue un fluido de perforación de una composición específica llamada B1 que representa de forma precisa a un sistema viscoelástico en el área, y la selección del modelo de un régimen de flujo (laminar), siendo este el más adecuado para este tipo de estudio garantizando el cumplimiento de las leyes de conservación.
- La correcta configuración del mallado, adecuada selección de las condiciones de contorno y configuración de la pared móvil que representaba al pistón con su movimiento de velocidad cambiante en él tiempo, dieron paso a una correcta simulación, garantizando la convergencia de la simulación.
- En las Gráficas 8 y 20 se demuestró como la propiedad de cambio de la viscosidad con respecto al esfuerzo se desenvuelve en todo el proceso de la bomba y afecta la facilidad para fluir de forma repentina, lo cual establecemos como un beneficio para suavizar las condiciones de trabajo de la bomba Triplex.

- Tanto la carrera de carga y como la de descarga poseen un punto crítico situado a la mitad de la carrera cuando la velocidad es máxima (Gráficas 2 y 11) debido a la característica cambiante del movimiento del pistón en el cual los resultados arrojados pueden clasificarse como máximos, dicho punto se sugiere es el propicio para iniciar cualquier tipo de diseño correspondiente a una bomba de pistones lineales.
- En la cámara de flujo tanto en la carga como la descarga se alcanzan puntos máximos de vorticidad en las zonas donde el fluido cambia de la cámara del pistón a una de las tuberías (entrada o salida) como lo demuestran las gráficas 9 y 21. En la etapa de descarga especialmente se puede intuir que este valor máximo de vorticidad es indicio de una transición de régimen laminar a turbulento, apoyado en los resultados del número de Reynolds.
- En las gráficas 13, 14 y 15 se demostró como la zona de fluencia del flujo cambia inversamente al cambio de la viscosidad dinámica, es decir, a mayor facilidad de fluir en una zona específica habrá menor viscosidad en dicha zona por parte del fluido viscoelástico.

RECOMENDACIONES

- Realizar un estudio de CFD en régimen turbulento en la sección circular del pozo para investigar el comportamiento del fluido de perforación viscoelástico antes de entrar en contacto con la mecha de perforación y los sólidos de deposición desprendidos durante la perforación
- Estudiar en régimen deslizante la sección anular del pozo para investigar cómo se desempeña un fluido de perforación viscoelástico contaminado con los recortes del pozo y una alta viscosidad intentado desplazarse hacia arriba.
- Investigar mediante una simulación multifísica de interacción fluido-sólido (FSI, por sus siglas en inglés), en la cámara del cilindro para determinar las reacciones a las que se encuentran sometidos los pistones de una bomba triplex o como estas reacciones son transferidas al sistema mecánico del Power End.
- Ampliar la información que se conoce de los fluidos de perforación viscoelásticos, para así determinar posibles zonas de trabajo donde pueden ser útiles y de mayor rendimiento que otro tipo de fluidos.
- Analizar cómo puede afectar el comportamiento del flujo viscoelástico a las válvulas estándares de una bomba Triplex.
- Utilizar COMSOL Multiphysics para cualquier estudio de CFD, transferencia de calor o combinación multifísica compleja debido a su alta capacidad de modelar problemas reales, facilidad de uso y poder de resolver métodos de elementos finitos.

REFERENCIAS

- Arias, F. (2006) **El Proyecto de Investigación: Introducción a la Metodología Científica**. Venezuela. 6ta edición. Editorial Episteme.
- Bui B., Saasen A., Maxey J. y Ozbayoglu M. (2012). **Viscoelastic properties of Oil-Based Drilling Fluids**. Publicación científica. Publicado. The University of Tulsa (TU). Tulsa, Estados Unidos.
- Ferziger, J. y Peric, M. (2002). **Computational Methods for Fluid Dynamics**. 3ra edición.
- Hernández, R. Fernández, C. y Baptista L. (2006). **Metodología de la Investigación**. 4ta Edición. México: Mc Graw Hill
- Jung Process Systems (S/F). **Bombas de Desplazamiento Positivo**. [Documento en línea]. Disponible en: <https://www.jung-process-systems.de/es/glosario/bombas-de-desplazamiento-positivo.html> [Consultado: 25/01/2020].
- Nordic Rheology Society. **Introduction to Rheology** [En línea]. Disponible: <https://nordicrheologysociety.org/Home/Rheology> [Consulta: Enero 2020, 29].
- Malaver, A. (2012). **Formulación de un fluido viscoelástico para la perforación de la sección horizontal con aplicación en los campos Bare y Melones del distrito San Tomé**. Trabajo de Grado. Universidad de Oriente. Monagas, Venezuela.
- Moreno E., Cervera M. (2015), en su **Elementos finitos mixtos estabilizados para fluidos confinados de Bingham y de Herschel-Bukley. Parte I: Formulación**. Publicación científica. Publicado. La Universidad Politécnica de Catalunya, España.

Ortega A., Molero J., Rivas A. y Sánchez V. (2002). **Fluidos de Perforación** Los Teques, Miranda: PDVSA Centro Internacional de Educación y Desarrollo (CIED).

Williamson D. (2013). **Fundamentos de los Fluidos de Perforación Oilfield Review n°1 Schlumberger** [Documento en línea]. Disponible: https://www.academia.edu/11281445/Fundamentos_de_los_fluidos_de_perforaci%C3%B3n [Consulta: Enero2020, 30].

Pride (S/F). **Curso de Bombas de Lodo**. [Documento en línea]. Disponible en: <https://es.slideshare.net/magnusgabrielhuertafernandez/curso-de-bombas-de-lodos> [Consultado: 26/01/2020].

Schlumberger (S/F). **JET Modulo 2 Bombas Triplex**. [Documento en línea]. Disponible en: https://www.academia.edu/33319171/Bombas_Triplex [Consultado: 25/01/2020].

Zorrilla. (1993). **Introducción a la Metodología de la Investigación**. México: Aguilar.