	UNIVERSIDAD FRANCISCO DE PAULA SANTANDER OCAÑA			
	Documento FORMATO HOJA DE RESUMEN PARA TRABAJO DE GRADO	Código F-AC-DBL-007	Fecha 10-04-2012	Revisión A
Dependencia DIVISIÓN DE BIBLIOTECA	Aprobado SUBDIRECTOR ACADÉMICO		Pág. i(151)	

RESUMEN – TRABAJO DE GRADO

AUTORES	MAURICIO PÉREZ VACCA		
FACULTAD	DE INGENIERÍAS		
PLAN DE ESTUDIOS	INGENIERÍA MECÁNICA		
DIRECTOR	DANIEL ANDRÉS QUINTERO CORONEL		
TÍTULO DE LA TESIS	DISEÑO Y SIMULACIÓN DE UNA PLATAFORMA DE PERFORACIÓN HIDRÁULICA PARA POZOS DE AGUA EN SECTORES RURALES DE LA PROVINCIA DE OCAÑA, NORTE DE SANTANDER		
RESUMEN (70 palabras aproximadamente)			
<p>ESTE TRABAJO TIENE COMO OBJETIVO EL DESARROLLO DE UN PROTOTIPO DE PLATAFORMA DE PERFORACIÓN HIDRÁULICA ADAPTADO A LAS CONDICIONES DE SUELO DE LA PROVINCIA DE OCAÑA PARA FINES DE EXTRACCIÓN DE AGUAS SUBTERRÁNEAS; YA QUE LA REGIÓN NO CUENTA CON UN EQUIPO CAPAZ DE ESTE TRABAJO Y SE PRESENTA DESABASTECIMIENTO DEL RECURSO HÍDRICO. EL DISEÑO DEL SISTEMA SE EVALUÓ CON AYUDA DEL SOFTWARE CAD/CAE EN TODOS LOS ELEMENTOS PRINCIPALES; AL IGUAL QUE SE COMPROBÓ EL CORRECTO FUNCIONAMIENTO MEDIANTE SIMULACIÓN.</p>			
CARACTERÍSTICAS			
PÁGINAS: 149	PLANOS:	ILUSTRACIONES: 57	CD-ROM:



Vía Acolsure, Sede el Algodonal, Ocaña, Colombia - Código postal: 546552
 Línea gratuita nacional: 01 8000 121 022 - PBX: (+57) (7) 569 00 88 - Fax: Ext. 104
 info@ufpso.edu.co - www.ufpso.edu.co

**DISEÑO Y SIMULACIÓN DE UNA PLATAFORMA DE PERFORACIÓN
HIDRÁULICA PARA POZOS DE AGUA EN SECTORES RURALES DE LA
PROVINCIA DE OCAÑA, NORTE DE SANTANDER**

AUTOR

MAURICIO PÉREZ VACCA CÓDIGO: 180951

Trabajo de grado presentado como requisito para optar el título de Ingeniero Mecánico

Director

Ing. MSc. DANIEL ANDRÉS QUINTERO CORONEL

Ingeniero Mecánico

UNIVERSIDAD FRANCISCO DE PAULA SANTANDER OCAÑA

FACULTAD DE INGENIERÍAS

INGENIERÍA MECÁNICA

Ocaña, Colombia

Abril, 2021

Dedicatoria

Dedico principalmente este trabajo a Dios, por haberme dado la vida y permitirme el haber llegado hasta este momento tan importante de mi formación tanto profesional como personal.

A mis padres, Cristo Humberto y Nuriba que, a pesar de su distancia física, están conmigo de forma incondicional día tras día.

A mi compañera excepcional Yeiny, quien ha estado a mi lado en aquellos momentos buenos y malos.

A mi princesa y hermosa Sarah Victoria por ser ese angelito y luz de mi vida; que gracias a sus locuras me dan ese impulso para seguir dando lo mejor de mí.

A mis hermanas, Maira Alejandra y Cristina quienes me han apoyado en cada aventura que emprendo.

A mis sobrinos, Esteban y Sharol que sirvieron de apoyo para este fin tan importante.

A mis familiares y Amigos en general; por darme tanto en mí ser personal, sin ellos no podría haber obtenido este triunfo, fueron de base importante para este proyecto.

Finalmente, a un gran amigo, que marcó la etapa de mi camino universitario, ayudándome en asesorías y dudas presentadas en la elaboración de este trabajo de grado, al Ingeniero Mecánico MSc Daniel Andrés Quintero Coronel, director de este proyecto.

Para todos ellos esta dedicatoria.

MAURICIO PÉREZ VACCA

Agradecimiento

Primero que todo, dar gracias infinitas a Dios, por estar conmigo en cada paso que doy, por iluminar mi mente y haber puesto en mi camino a aquellas personas que han sido mi soporte y compañía durante todo el periodo de estudio.

Agradecer hoy y siempre a mis padres porque sin ellos no estuviese dado este inicial paso que hoy se convierte en un gran final

De igual manera mi más sincero agradecimiento a toda mi familia, a mi abuela, tíos (as), primos(as), a mi querida compañera de vida, a mi hija, hermanas y demás familiares los cuales han sido la razón para enfrentar todas las adversidades que se cruzan en mi camino.

Agradezco a mi director de proyecto.

Al Ingeniero Mecánico MSc Daniel Andrés Quintero Coronel, en quien encontré un apoyo incondicional para el desarrollo de este trabajo.

Agradecimientos infinitos a todos.

MAURICIO PÉREZ VACCA

Índice

Capítulo 1. Diseño Y Simulación De Una Plataforma De Perforación Hidráulica Para Pozos De Agua En Sectores Rurales De La Provincia De Ocaña, Norte De Santander.	1
1.1 Planteamiento del problema.....	1
1.1.1. Uso adecuado del agua mediante la perforación.....	6
1.2 Formulación del problema	7
1.3 Objetivos	7
1.3.1 Objetivo General.....	7
1.3.2 Específicos	7
1.4 Justificación	8
1.5 Delimitaciones	9
1.5.1 Delimitación Operaria.	9
1.5.2 Delimitación conceptual.	10
1.5.3 Delimitación Geográfica.....	10
1.5.4 Delimitación Temporal.	10
 Capítulo 2. Marco Referencial	 11
2.1 Antecedentes Históricos.....	11
2.1.1 Antecedentes Históricos a Nivel Mundial.....	11
2.1.2 Antecedentes Históricos a Nivel Nacional.	14
2.1.3 Antecedentes Históricos a Nivel local.	19
2.2 Marco Contextual.....	19
2.2.1 Localización y características del lugar a aplicar.	19
2.2.2 División Política de la provincia.....	19
2.2.3 Hidrología de la Región.	21
2.2.4 El recurso del Agua en Colombia.	23
2.3 Marco Conceptual.....	24
2.3.1 Perforación de pozos.....	24
2.3.2 Torre-Plataforma de Perforación.	26
2.3.3 Suelos.	27
2.3.4 Reductor de Velocidad.....	29
2.3.5 Polea.	29

2.3.6	Manivela.	29
2.3.7	Eje de transmisión.	30
2.3.8	Malacate.	30
2.3.9	Bomba de lodo.	31
2.3.10	Barrena de Perforación.	31
2.3.11	Sarta de perforación.	31
2.3.12	Tubería de Perforación.	32
2.3.13	Unión Giratoria (Swivel).	33
2.3.14	Martillo.	33
2.3.15	Vástago de Perforación.	33
2.4	Marco Teórico.....	34
2.4.1	Generalidades de perforación.	34
2.4.1.1	<i>Perforación por Percusión.</i>	34
2.4.1.2	<i>Perforación por Rotación.</i>	36
2.4.1.3	<i>Perforación Rotaris.</i>	38
2.4.1.4	<i>Perforación mixta (Percusión – Rotación).</i>	38
2.4.1.5	<i>Perforación Manual.</i>	38
2.5	Marco Legal.....	39
2.5.1	Decretos Nacionales.....	39
2.5.2	Normativas Internacionales.....	40
2.5.1.2	<i>NS-1™ - Requisitos de calidad e inspección para los equipos de perforación y terminación de pozos.</i>	40
Capítulo 3. Diseño Metodológico.....		41
3.1	Metodología de la Investigación.....	41
3.1.1	FASE I: Revisión Literaria.	41
3.1.2	FASE II: Tecnologías de perforación.	41
3.1.3	FASE III: Cálculo y Diseño de la Plataforma.....	42
Capítulo 4. Cálculo, Análisis y Diseño de la plataforma.....		43
4.1	Investigaciones relevantes sobre las plataformas hidráulicas de perforación.....	43

4.1.1	Generalidades y características de los suelos del Municipio de Ocaña Norte de Santander.	48
4.1.1.1	<i>Características ambientales de la provincia de Ocaña.</i>	48
4.1.1.2	<i>Geología Regional.</i>	49
4.1.1.3	<i>Geología Local.</i>	50
4.2	Comparación de tecnologías de perforación y parámetros de diseño a considerar.	51
4.2.1	Alternativas para el diseño del bastidor a usar en la plataforma o torre de perforación..	53
4.3	Diseño conceptual de la plataforma de perforación.....	55
4.3	Aspectos a tener en cuenta en el diseño.....	57
4.3.1	Resistencia de la roca (S_c) y profundidad en la perforación.).	57
4.3.2	Velocidad de rotación.	59
4.3.3	Fuerza de empuje.....	60
4.3.4	Velocidad de penetración.....	63
4.3.5	Torque y potencia asociada a la perforación.....	64
4.4	Cargas externas sobre la plataforma de perforación.....	65
4.4.1	Posición 1 (Cuando la cabeza de perforación desciende).	67
4.4.2	Posición 2 (El mecanismo este tensionado después de haber realizado la perforación).	67
4.4.2.1	<i>Peso de la tubería.</i>	68
4.4.2.3	<i>Peso del terreno adherido al barreno.</i>	69
4.4.2.4	Peso del lodo en la tubería de perforación (sección anular).....	70.
4.4.2.5	<i>Peso del lodo en la tubería de perforación (sección interna).</i>	70
4.5	Bomba de succión de lodo.....	71
4.5.1	Velocidad y Caudal del fluido (material participado). Velocidad del fluido.....	71
4.6	Motor encargado de la rotación en el sistema de perforación.....	74
4.7	Selección del motor de empuje y diseño del sistema de elevación.....	75
4.7.1	Cálculo y selección de la cadena.	78
4.8	Dimensionamiento de las columnas del bastidor.....	82
4.9	Análisis de esfuerzos sobre la plataforma.....	87
4.10	Diseño estructural realizado en SolidWorks.....	94
4.11	Simulación mediante Software CAD/CAE (SolidWorks).....	97
4.11.1	Caso 1: Simulación de la estructura y/o armadura.....	98
4.11.2	Caso 2: Simulación de estructura y cabeza de perforación (sólido).	105
4.11.2.1	<i>Análisis Estático.</i>	106

4.11.2.2 *Análisis de Pandeo*: 114
4.11.2.3 *Análisis de Frecuencias*: 117

Conclusiones.....**121**

Recomendaciones**123**

Referencias**124**

Apéndices**132**

Lista de Tablas

Tabla 1 Descripción de costos totales de proyecto en la Mojana	4
Tabla 2 Hectáreas de explotación de crudo por departamento	16
Tabla 3 Precipitaciones en el mundo, Sur América y Colombia	23
Tabla 4 Revisión de literatura en relación a estudios de perforación.	44
Tabla 5 Mecanismos de Perforación.....	51
Tabla 6 Opciones de diseño del bastidor a usar en la plataforma o torre de perforación	54
Tabla 7 Tipo de roca y sus principales características	57
Tabla 8 Resultados de laboratorio de suelos del municipio de Ocaña.....	58
Tabla 9 Tipo de roca y sus principales características	61
Tabla 10 Situaciones de la plataforma	65
Tabla 11 Velocidades de fluido a extraer en la perforación	72

Lista de figuras

Figura 1. Plataforma de perforación con sus respectivos equipos.	12
Figura 2. Norte de la península de Kola, cerca de la ciudad de Zapoliarni.	13
Figura 3. Principales zonas de extracción de petróleo en Colombia.	15
Figura 4. Máquina perforadora de pozos de agua.	17
Figura 5. Mapa Político de la Provincia de Ocaña.	20
Figura 6. Hidrología de la región.	22
Figura 7. Equipo de perforación, terminación o reparación, área industrial.	25
Figura 8. Pozos y Sondeos.	25
Figura 9. Plataforma de perforación más grande del mundo llamada perdida.	27
Figura 10. Tipos de suelos.	28
Figura 11. Clasificación del suelo según la estructura.	29
Figura 12. Malacate manual.	30
Figura 13. Barrenas de perforación.	31
Figura 14. Sarta de perforación.	32
Figura 15. Curvas descritas por el balancín y el trepano.	35
Figura 16. Perforación por percusión.	36
Figura 17. Perforaciones por rotación.	37
Figura 18. Perforación Manual.	39
Figura 19. Diseño conceptual de la plataforma de perforación.	56
Figura 20. Relación velocidad de penetración vs velocidad de rotación.	59
Figura 21. Zonas de operación de la máquina.	60
Figura 22. Posiciones de trabajo de la sarta de perforación.	66

Figura 23. Bomba de desplazamiento positivo de engrane interno	71
Figura 24. Bomba para fangos ECH series	74
Figura 25. Motor hidráulico de engranaje CE series	75
Figura 26. Motor hidráulico de pistón axial DMFA de alta presión.....	78
Figura 27. Partes de Cadena de rodillos.....	79
Figura 28. Dimensiones de cadena Estándares de rodillos tipo americanas	80
Figura 29. Transmisión de Potencia para cadenas de rodillos	81
Figura 30. Esquema para dimensionar las columnas del bastidor.	82
Figura 31. Vista Lateral Izquierda de la Estructura.	88
Figura 32. Diagramas de cuerpo rígido.....	90
Figura 33. Perfil 60mm × 60mm × 4mm.....	93
Figura 34. Diseño en de la plataforma en SolidWorks.	95
Figura 35. (A) Piñón Conductor, (B) Piñón Loco	96
Figura 36. Sujeciones cadena-Base de perforación	96
Figura 37. Pasos para generar un estudio de Simulación.....	97
Figura 38. Información de modelo 1 para el análisis mediante SolidWorks.....	98
Figura 39. Propiedades del Material para el caso 1	99
Figura 40. Sujeción aplicada a la estructura en el estudio 1	100
Figura 41. Carga aplicada al bastidor	100
Figura 42. Contacto entre la fuerza y el mallado para el caso 1	101
Figura 43. Característica de la malla utilizada.....	101
Figura 44. Tensión Von Mises, Caso 1	102
Figura 45. Deformación de la estructura para las condiciones de estudio.....	103

Figura 46. Máximos y mínimos deformados	104
Figura 47. Factor de Seguridad del estudio 1	105
Figura 48. Información de modelo 1 para el análisis mediante SolidWorks.	106
Figura 49. Propiedades del material, Caso 2.....	107
Figura 50. Sujeción aplicada a la estructura	108
Figura 51.Cargas aplicadas a la estructura.....	109
Figura 52. Contacto entre las Fuerzas y el Mallado, Caso de estudio 2	109
Figura 53. Característica de la Malla Utilizada	110
Figura 54. Tensión Von Mises, Caso 2.....	111
Figura 55. Deformación para estudio 2.....	112
Figura 56. Máximos y mínimos deformados, Caso 2	113
Figura 57. Factor de seguridad, estudio 2	114

Lista de Apéndices

Apéndice A. Ficha Técnica de la plataforma hidráulica de perforación para pozos de agua 133

Resumen

La perforación de pozos ha mostrado un avance importante en la explotación y exploración de recursos hídricos, petroleros y de gas natural. La explotación de gas natural y petróleo han sido los principales motores de avance en el desarrollo de plataformas de perforación. Así mismo, este avance fue fundamental en el desarrollo de plataformas encargadas de extraer agua subterránea en diversas partes del mundo. Este proyecto desarrolla un análisis teórico para el diseño y simulación de una plataforma de perforación hidráulica con base en las características de los suelos rurales de la provincia de Ocaña, Norte de Santander.

El estudio comenzó con un análisis de las características de los suelos de la región mediante una revisión de la literatura. Los resultados de esta etapa indican que el suelo analizado tiene una resistencia a la compresión de 45.69 MPa, lo que lo clasifica como suelo “blando”. La revisión de las tecnologías de perforación permitió comparar ventajas, desventajas y características de desempeño de las mismas, las cuales sirvieron para estimar dimensiones y definir el diseño conceptual de la plataforma de perforación.

Para las condiciones de carga encontradas, la fuerza máxima que soporta la estructura fue 46.7 kN, que corresponde a la fuerza de empuje. Los resultados de simulación mostraron que, para las condiciones de carga, dimensiones definidas y mediante un análisis basado en esfuerzos, la plataforma operó siempre en una zona segura con un factor de seguridad mínimo de 2.7.

Introducción

El uso de agua es vital para la supervivencia de cualquier especie. El crecimiento de la población y con ello las actividades que se realizan a diario ha provocado el desabastecimiento de las fuentes hídricas. A pesar de que Colombia cuenta con una gran cantidad de recursos hídricos, se prevé que el 68% se destina a la generación de energía eléctrica en las hidroeléctricas, otro porcentaje se destina a las termoeléctricas, y el restante a diversas actividades, dentro de las cuales se incluye el tratamiento de la misma para uso y aprovisionamiento de actividades domésticas de la población. Se estima que el 97.4% de los hogares colombianos cuentan con servicio de agua potable en la zona urbana, mientras sólo el 73.2% de la zona rural cuenta con este suministro.

Esta propuesta surge al considerar estrategias que permitan la mitigación de las zonas apartadas del casco urbano que no cuentan en su totalidad con el recurso hídrico suficiente para sus actividades diarias. De esta manera, aquí se considera el estudio de sistemas de perforación que permitan la extracción de hídrica a partir de aguas subterráneas. El proceso de extracción de agua subterránea requiere el uso de maquinaria especializada en la perforación de suelos. Estos equipos deben diseñarse para que el elemento perforador sea capaz de soportar y vencer el esfuerzo que el suelo causa. Estas máquinas se encuentran en el mercado; sin embargo, la adquisición o alquiler de estos equipos puede ser costoso.

Con base en esto, este anteproyecto se desarrolla en cuatro capítulos que relacionan los fundamentos teóricos a tener en cuenta para el desarrollo de un dispositivo de perforación de pozos para la extracción de agua.

El primer capítulo expone las bases del proyecto, se da a conocer la problemática existente en la región; su solución más factible y su uso adecuado. Se interpreta la finalidad primordial del proyecto en su objetivo general y en sus objetivos específicos.

En el segundo capítulo se dan a conocer todos los conceptos aplicados y relacionados con la propuesta, algunas características que posee la hidrología en la región norte de la provincia, la ubicación de aguas subterráneas que se puedan explorar, tipos, mecanismos y usos frecuentes en el ámbito de la perforación, así como la clasificación que constituyen los suelos. Un marco Histórico general y completo desde la perspectiva mundial en cuanto al impacto que ha causado en la tierra todo lo relacionado con la perforación también es analizado.

En un tercer capítulo que constituye el diseño metodológico, se describe la metodología a implementar, así como las fases que la constituyen. Por último, en el capítulo 4 se exponen los resultados como producto de las fases que ejecutan los avances de la metodología planteada previo al desarrollo del proyecto planteado; permitiendo así el Diseño y la simulación de la plataforma de perforación aplicada a las características de la ciudad de Ocaña.

Capítulo 1. Diseño Y Simulación De Una Plataforma De Perforación Hidráulica Para Pozos De Agua En Sectores Rurales De La Provincia De Ocaña, Norte De Santander.

1.1 Planteamiento del problema

En la actualidad existen factores que son vitales y de gran importancia a la hora de subsistir en una comunidad, el agua es una sustancia que posee un alto valor humano; ésta, cubre las tres cuartas partes de la superficie de la tierra. Suple y cumple un papel fundamental en la actividad biológica, desde aplicativos de disoluciones de sales hasta mantener la temperatura del cuerpo humano mediante la transpiración de la piel (sudor).

Se estima que el planeta está conformado por 71% de agua. De este porcentaje, el 96.5% es agua salada que se localiza en los océanos, y, el 3.5% restante es agua dulce que se encuentra en arroyos, ríos, lagos, y bajo la superficie de la tierra. Según la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (OCDE), del total de agua dulce, sólo un 30% es aprovechable puesto que el porcentaje restante se encuentra congelado.

Según la información contenida en el CONPES 3918 de Colombia, se estima que el 97.4% de los hogares colombianos cuentan con servicio de agua potable en la zona urbana, mientras sólo el 73.2% de la zona rural cuenta con este suministro (Castellanos Garcia D., 2008) . Por tanto, el sector rural es uno de los más afectados en cuanto a la potabilidad del agua, puesto que, dada su ubicación el acceso a este servicio es complicado. La población rural puede optar por la compra de agua potable en recipientes para actividades de cocina y/o consumo doméstico y

realizar una excavación manual de “pozos” de agua para actividades de siembra en los diversos cultivos. Aun lado a esta problemática, la OCDE plantea que para el año 2030, la oferta de agua potable no será capaz de cubrir la demanda en un 40%. Así mismo, se prevé que este porcentaje pueda incrementar debido a los efectos del cambio climático (Sanchez , 2018)

Norte de Santander, uno de los departamentos de Colombia, informa que el servicio de agua potable tiene una cobertura del 90% acorde a lo reportado en el plan de desarrollo departamental (Gabinete Municipal & Yañez, n.d.). A pesar de que esto corresponde a un alto porcentaje, se estima que la región suroccidental (Abrego, Cachira, Convención, el Carmen, la Esperanza, Hacarí, la Playa de Belén, Ocaña, San Calixto y Teorama) y la región central (Arboledas, Cucutilla, Gramalote, Lourdes, Salazar de las Palmas, Santiago y Villa caro) se encuentran por debajo de este valor. En el departamento, la agricultura es el sector que más uso de agua dulce requiere, representa un 46.6%, seguido por el sector energético, pecuario, doméstico e industrial, los cuales representan el 21.5%, 8.5%, 8.2% y 5.9%, respectivamente, del consumo hídrico de la región.

Dentro de los municipios de Norte de Santander, Ocaña se encuentra rodeada por el río Catatumbo, tejo y varias quebradas (DAG Ingeniería S.A.S., 2014). En este municipio, la empresa de Servicios Públicos de Ocaña (ESPO S.A) y la Asociación de Amigos Usuarios del Acueducto Independiente (ADAMIUAIN) se encargan del suministro de agua potable. Es decir, las fuentes hídricas de la provincia de Ocaña se manipulan y adaptan para su consumo masivo y activo de la población. Acorde al plan de desarrollo municipal (Alcaldía de Ocaña, 2019) el

sector urbano tiene una cobertura del 97.7% de agua potable. Por el contrario, cifras en el sector rural no han sido estimadas acorde a la revisión de literatura realizada en este trabajo.

Una alternativa sostenible para garantizar el acceso al agua en zonas alejadas del casco urbano es el aprovechamiento del agua subterránea de los diferentes suelos. El líquido puede permanecer oculto durante miles o millones de años bajo la superficie terrestre. Además, gran parte de estos yacimientos se encuentran a una profundidad accesible, lo que facilita su extracción. De esta manera, este líquido puede aparecer en la superficie en forma de manantiales; siendo extraída mediante perforaciones y llevadas a pozos, para su libre uso.

El proceso de extracción de agua subterránea requiere el uso de maquinaria especializada en la perforación de suelos. Estos equipos deben diseñarse para que el elemento perforador sea capaz de soportar y vencer el esfuerzo que el suelo causa. Estas máquinas se encuentran en el mercado; sin embargo, la adquisición o alquiler de estos equipos puede ser costoso. Basados en un trabajo realizado en el 2015 por dos estudiantes de la universidad católica de Colombia, cuyo trabajo se tituló “Diseño de Sistemas de Pozos para la captación de agua Subterránea” y fue aplicado en la Mojana (Departamento de Bolívar), los autores estimaron que los costos para la construcción de pozos en este sector de Colombia tienen un valor aproximado de \$ 31.618.000 (\$ pesos colombianos) como se muestra en la Tabla 1.

Como se aprecia en esta tabla, el transporte del equipo de perforación, el personal encargado en ello, junto con todos los materiales al sitio de la obra superó un valor de \$20.000.000, y así sucesivamente en orden descendente; (Ardila & Rodríguez, 2015).

Para el año 2015 los precios oscilaron acorde a las características de operación; no obstante, sirven como valores de referencia a tener en cuenta.

Tabla 1. Descripción de costos totales de proyecto en la Mojana

Detalle	Unidad	Cantidad	Valor
Transporte de equipo total de perforación		1	\$ 20.000.000,00
Instalación y adecuación	Un	1	\$850.000,00
Perforación de prueba	M	70	\$ 970.000,00
Registro eléctrico	M	70	\$630.000,00
Preparación de tubería y filtros	M	70	\$ 280.000,00
Instalación de tubería y filtro	M	70	\$ 670.000,00
Prueba de bombeo inicial		1	\$ 180.000,00
Construcción de cabeza de pozo		1	\$ 745.000,00
Suministro de tubería de PVC	M	50	\$ 680.000,00
Suministro de gravilla	m ³	10	\$ 220.000,00
Lavado y desarrollo del pozo	Un	1	\$ 345.000,00
Desinfección del pozo		1	\$ 78.000,00
Suministro e instalación de Bomba	Un	1	\$ 5.670.000,00
Análisis físico-químico y bacteriólogo del agua	Un	1	\$ 300.000,00
Total, costos forma general			\$ 31.618.000,00

Nota: Autor del Proyecto

Por otra parte, existe la posibilidad de que por sus dimensiones no puedan ser transportadas a los lugares en que es requerido; esto dificulta la operación y puesta en marcha del equipo.

En Ocaña y sus alrededores no existe (acorde a conocimiento de autor) maquinaria capaz de realizar este trabajo, así como formas de extracción relacionadas a ésta en cuanto a diseños y prototipos. Estos lugares (sector rural) en su mayoría tienen poco acceso a agua potable para el consumo humano, o fuentes hídricas para riego de cultivos. A pesar que la región cuenta con zonas adecuadas para la perforación y extracción de agua, esto no se lleva a cabo, posiblemente por los costos asociados, desconocimiento de la tecnología, o por falta de equipos adecuados a las condiciones de suelo de la región.

Un estudio de realizado por estudiantes de la universidad Industrial de Santander (UIS) titulado “Diseño y Construcción de una unidad móvil de perforación para pozos profundos de agua potable para la empresa perforaciones montajes equipos y suministros S.A.S.” especifica más recientemente valores de material así como costos del trabajo realizado; (Corredor & Bayona, 2017). Los autores estiman un costo del proyecto de \$ 50474000 pesos colombianos aproximadamente, especificando cada gasto e inversión en el desarrollo de la unidad móvil de perforación, la bomba hidráulica de lodos, la junta universal, el reductor el malacate, la mesa rotatoria, las brocas y entre otras herramientas hacen parte de este análisis. (Corredor & Bayona, 2017).

Los estudios mencionados anteriormente, permiten visualizar que los costos asociados a la extracción y perforación de pozos de agua son elevados, de esta manera, cualquier cambio o modificación que permita la disminución de los mismos facilitará el uso de esta tecnología y eliminará las barreras para su aplicación.

Finalmente, lo expuesto anteriormente, permite el desarrollo de estudios que propicien el análisis de soluciones en esta área, y requiere de proyectos que permitan estudiar el uso de equipos que logren la extracción de recurso hídrico en lugares en los que por sus condiciones no es posible el acceso al suministro de agua potable; en el mercado industrial de la perforación existe una alta demanda de esta labor. En su mayoría los equipos para la extracción del agua mediante pozos superan valores de los \$ 20.000.000 (\$, pesos colombianos) expuestos en investigación y en equipo. Lo que representa un alto costo asociado a este tipo de actividades.

1.1.1. Uso adecuado del agua mediante la perforación. Al abordar temas relacionados con recursos alternos y/o renovables, los recursos hídricos subterráneos se convierten en la reserva más importante de agua en el planeta. Se encuentran debajo de la superficie de la tierra, específicamente en sectores arenosos o rocas con poros en el subsuelo. En Colombia su utilización data de varias décadas, mientras que su explotación aumenta al disminuir la oferta de fuentes hídricas superficiales. El agua subterránea tiene un importante papel en la naturaleza, dependiendo del tipo de roca, de las características del agua filtrada y de los procesos microbiológicos que posea suelo, sustenta muchos de los servicios que se derivan en manantiales, pozos artesanales, pozos profundos y demás tipos de captaciones. Además, es esencial en muchas situaciones para suplir las necesidades de agua de la humanidad de forma segura, económica, para usos urbanos, industriales y de riego. El agua es un recurso limitado y también vulnerable que debe ser gestionado, para hacerlo sostenible; mediante la captación adecuada en una instalación que disponga de su uso.

El uso racional de aguas mediante la excavación subterránea y la gestión sostenible de un acuífero se basa en el conocimiento del sistema hidrogeológico, el cual se logra mediante la combinación de tareas de exploración e investigación que permite obtener, refinar y validar modelos hidrológicos que explican sus propiedades físicas, las relaciones con el agua superficial, los mecanismos de recarga y descarga, y los procesos químicos que condicionan la calidad del recurso (Universidad De Medellin et al., 2011).

1.2 Formulación del problema

Según la situación actual de esta problemática y las investigaciones relacionadas al diseño de la plataforma de perforación Hidráulica, se plantea la siguiente pregunta:

¿Cuál sería el diseño adecuado desde la perspectiva técnica y económica para la plataforma de perforación Hidráulica de pozos de agua que pueda adaptarse a las condiciones del suelo de la provincia de Ocaña? ¿Qué características debe tener la perforadora Hidráulica para pozos de agua que la diferencie de los equipos existentes?

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo General

Diseñar una plataforma de perforación Hidráulica para pozos de agua que se adapte a las condiciones del suelo en la provincia de Ocaña, Norte de Santander.

1.3.2 Específicos

Evaluar mediante revisión de literatura las características generales de los suelos del municipio de Ocaña para la estimación de esfuerzos mecánicos y/o térmicos en herramientas de perforación.

Realizar un análisis comparativo de las tecnologías de perforación de pozos de agua que permitan la definición de especificaciones operativas y restricciones de diseño en estos equipos.

Calcular y evaluar el diseño del sistema de perforación mediante el análisis matemático con la ayuda del Software CAD/CAE de todos los elementos principales; comprobando el correcto funcionamiento de la máquina mediante simulación.

1.4 Justificación

Lo expuesto en la sección 1.1 manifiesta la problemática existente en el aseguramiento del acceso al agua en diversas regiones de la provincia de Ocaña. Así mismo, muestra la posibilidad de que este recurso no pueda cubrir la demanda que la población necesita en un futuro cercano. Acorde a esto, la extracción de agua subterránea mediante tecnología de perforación de pozos surge como una opción atractiva. No obstante, la adquisición de esta tecnología puede ser costosa y puede concebir problemas de transporte en aquellas regiones que por sus condiciones son de acceso difícil o restringido.

De esta manera, esta propuesta surge con el propósito de explorar opciones que faciliten el análisis de tecnologías para la extracción de agua subterránea que se adapte a las condiciones del suelo de la región. Esto permite identificar zonas que acorde a sus condiciones cuentan con potencial hídrico suficiente y explorable. Además, la propuesta servirá de fundamento teórico para estudios más avanzados en esta temática.

Con base en lo anterior, en esta propuesta se plantea un estudio teórico para el diseño y simulación de una perforadora para pozos de agua. El proyecto buscará realizar una geometría virtual que muestre el funcionamiento y partes asociadas a este tipo de maquinaria. Además, el

cálculo analítico de esfuerzos y su comparación con resultados de simulación permitirá la validación y/o cambios del diseño planteado.

Con el diseño desarrollado y validado estudios futuros podrían tomar como guía este trabajo para pasar del análisis teórico planteado a la construcción del equipo, lo que a su vez permitiría explorar la extracción de agua subterránea en la región.

Finalmente, se espera que este trabajo demuestre que su posible puesta en marcha permitiría que en la región de Ocaña (Norte de Santander) existiera una evolución y transformación en la forma de obtención del agua vista desde un panorama regional, nacional e internacional, lo que a su vez contribuiría a aumentar los porcentajes de acceso de recurso hídrico.

1.5 Delimitaciones

Este proyecto comprende la evaluación del desempeño de las plataformas de perforación existentes en la actualidad. Las delimitaciones comprenden: Delimitación operativa, Conceptual, Geográfica y Temporal. A continuación, se exponen cada una de estas.

1.5.1 Delimitación Operaria. Para el desarrollo de la propuesta planteada, se cuenta con la ayuda y asesoría del director de tesis, y se prevé la búsqueda de asesoramiento de personas competentes relacionadas con el tema de investigación, lo que permitirá la realización de los objetivos planteados y planeados en el proyecto.

1.5.2 Delimitación conceptual. El proyecto tendrá una temática amplia de conceptos según su complejidad. La propuesta planteada se limita a los conocimientos adquiridos en el transcurso del pregrado, especialmente en las asignaturas de Cálculo de elementos de máquinas I-II y mecánica de fluidos.

Dada la temática abordada, el análisis y cálculo de esfuerzos mecánicos, evaluados bajo condiciones de carga estática y dinámica son los principales aspectos a considerar. Así mismo, el uso de herramientas de simulación y la interpretación de resultados obtenidos mediante estas son necesarios.

1.5.3 Delimitación Geográfica. La investigación a realizar en este proyecto se llevará a cabo teniendo en cuenta las características de la provincia de Ocaña; su hidrología y potestad del suelo; más específicamente en sectores rurales de difícil acceso.

1.5.4 Delimitación Temporal. El presente proyecto investigativo tendrá una duración aproximada de 16 Semanas a partir de la fecha de aprobación del anteproyecto, mostrando y evidenciado en el cronograma de actividades.

Capítulo 2. Marco Referencial

2.1 Antecedentes Históricos

Las perforadoras usadas mediante plataformas hidráulicas han tenido un impacto revolucionario. Su manejo, finalidad, y eficiencia es amplia. Grandes petroleras a nivel mundial han creado equipos capaces de captar productos o materias primas comunes, por ejemplo, petróleo.

Dada su historia, estos equipos generalmente se relacionan con actividades de exploración de pozos petroleros; sin embargo, su uso se ha extendido a la exploración de recursos hídricos mediante extracción de agua subterránea.

De esta manera, en esta sección se hace un análisis histórico de las actividades de perforación con el fin de explorar recursos necesarios para el desarrollo de la civilización.

2.1.1 Antecedentes Históricos a Nivel Mundial. De una forma general esta sección inicia con un antecedente general basado en la perforación de pozos de agua a nivel mundial; según la historia, un arquitecto del siglo I a C. llamado Marco Vitruvio Polión definió por primera vez un pozo de agua como una excavación subterránea vertical y cilíndrica cuyo objetivo principal fue obtener agua para el uso familiar o industrial, o también para exploración y obtención de petróleo que sería utilizado para beneficio económico.

Las grandes empresas de explotación a nivel mundial utilizan equipos de punta generando pozos perforados de una gran profundidad; la *Figura 1* muestra los equipos más importantes y relevantes de una plataforma de perforación.

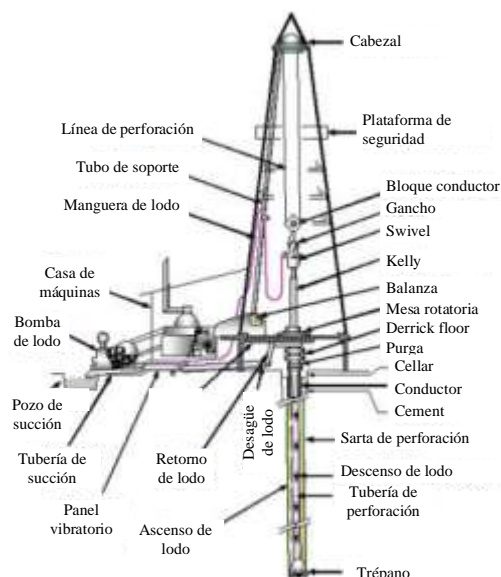


Figura 1. Plataforma de perforación con sus respectivos equipos.

Fuente. (Bourgoyne, 1986)(Hossain & Abdulaziz Abdullah, 2015)

Generalmente la perforación es el proceso mediante el cual se excava en la tierra con un mecanismo para la obtención de algún recurso ubicado en el subsuelo subterráneo a más de 20 metros de profundidad.

Se deduce que, en momentos de la historia para poder extraer líquido de los pozos se debían utilizar bombas sumergibles, es decir, dispositivos que fuesen capaces de extraer el líquido; no obstante, en esa época herramientas de piedra fueron los únicos elementos con lo que se disponía, esto permite concluir que los primeros pozos para la extracción de líquidos se llevaron a cabo en el periodo Neolítico (edad de piedra 1900 a. C.). Las primeras excavaciones

se realizaron en Siria y en Chipre; la primera perteneciente oficialmente a la República Árabe de Siria, siendo éste un país soberano del Oriente Medio, mientras que la segunda pertenece hoy en día como la isla República de Chipre de la mediterránea oriental. Estos primeros trabajos de perforación alcanzaron alrededor de dos metros de diámetro y unos cuatro a diez metros de profundidad. Estas excavaciones se realizaron hace más de nueve mil años. (Buch, 2017)

A nivel mundial se encontró el primer pozo perforado en la isla de Finlandia, mostrado en la figura 2, el cual recibió el nombre del Pozo Superprofundo de Kola (KSDB) o también llamado como el SG-3. Su profundidad fue de 12.226 metros (12.2 Kilómetros aproximadamente) sobre la corteza terrestre; no obstante, las condiciones de este gran pozo se consideraban extremas, ya que la temperatura interna en él oscilaban entre los 200 grados centígrados, puesto que, estaba más cerca al núcleo terrestre, ocasionando altas temperaturas (Telecinco, 2020). *Figura 2* muestra la ubicación exacta del pozo perforados en la isla de Finlandia.

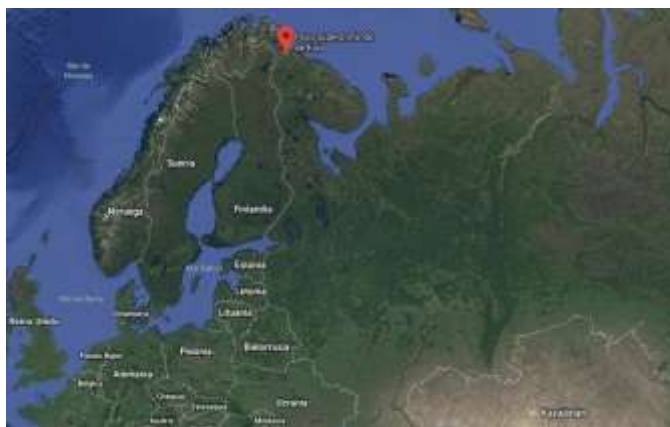


Figura 2. Norte de la península de Kola, cerca de la ciudad de Zapolyarni.

Fuente: (El Clarin, 2019)

De este modo, este pozo desarrollado en los años 70 y 80 se convirtió en un antecedente mundial ya que marcó la pauta primordial en todo lo relacionado en la perforación de pozos. Además, permitió la exploración y análisis de rocas y material volcánico existente a grandes profundidades de la corteza terrestre.

Este pozo dio un gran valor científico en la época permitiendo descubrir que, a profundidades de 6.840 metros, se encontraron granitos, encontrando en ese momento una nueva estructura terrestre en la corteza continental respectivamente. (cinco & española, 2020)

2.1.2 Antecedentes Históricos a Nivel Nacional. Las perforaciones en Colombia han venido en los últimos años en aumento con la productividad y extracción del petróleo.

El 29 de abril del 1918 se descubre en Colombia el pozo Infantes 2 por parte de la empresa Tropical Oil Company (compañía el troco), en el corregimiento El Centro a 22 kilómetros de Barrancabermeja (Santander), el cual dio inicio a la historia de la industria petrolera en Colombia; originando en esta zona al campo conocido como la Cira Infantes. Actualmente, este campo pertenece a Ecopetrol, cumpliendo más de un siglo de explotación. Se estima que su producción es de 850 millones de barriles a la actualidad, convirtiéndolo en uno de los tres campos más importantes del país en materia de extracción de hidrocarburos, junto a Caño Limón, en Arauca y Cusiana Cupiagua en Casanare (El Tiempo, 2018).

La *Figura 3* muestra la región en la que Ecopetrol tiene su centro de extracción a nivel nacional.



Figura 3. Principales zonas de extracción de petróleo en Colombia.

Fuente: (Arcila, 2018b)

Meta y Casanare concentran el 70% del crudo en el país. Del departamento del Meta sale la mayor cantidad de petróleo dando así el 37.6% de la producción nacional. Departamentos como Santander, Meta y Casanare suman un 76% de la producción de petróleo en el país colombiano. Se estima que Ecopetrol obtiene a través de sus distintos campos de extracción el 54,6% de producción por BPDC (barriles de petróleo promedio día calendario colombiano respectivamente).

Según el área de explotación, el departamento de Santander tiene más hectáreas asignadas en la producción de hidrocarburos, ocupa más de la mitad del territorio con un 59.6% equivalentes en 1.818.924 hectáreas. En un orden ascendente le siguen Casanare y Tolima. Meta realiza su producción ya que produce más de la mitad del petróleo nacional, sólo con el 4.3% se dedica a la explotación (Arcila, 2018a).

Como se observa en la Tabla 2 , el departamento de Santander tiene más hectáreas asignadas a la explotación de hidrocarburos con relación a los departamentos de Huila, Antioquia, Cundinamarca, Boyacá, Guajira, Nariño, Magdalena, entre otros.

Tabla 2. Hectáreas de explotación de crudo por departamento

Departamento	Área Producción, Hectáreas	Área total, Hectáreas	Área en %
Santander	1.818.924	3.053.700	59.6 %
Casanare	1.097.726	4.464.000	24.6 %
Tolima	836.750	2.358.200	35.5 %
Arauca	604.431	2.391.800	25.4 %
Cesar	568.562	2.290.500	24.8 %
Bolívar	531.624	2.597.800	20.5 %
Putumayo	377.161	2.499.500	15.2 %
Meta	367.301	8.563.500	4.3 %
Norte de Santander	386.163	2.165.800	16.9 %
Huila	301.385	1.989.000	15.2 %
Antioquia	299.831	6.361.200	4.7 %
Cundinamarca	285.348	2.263.300	12.6 %
Boyacá	210.697	2.318.900	9.1 %
Guajira	163.942	2.084.800	7.9 %
Nariño	113.513	3.326.800	3.4 %
Magdalena	112.924	2.318.800	4.9 %
Sucre	40.782	1.091.700	3.7 %
Caldas	22.096	788.800	2.8 %
Cauca	21.224	2.930.800	0.7 %
Caquetá	15.816	8.896.500	0.2 %
Córdoba	4.180	2.502.000	0.2 %
Vichada	1541	10.024.200	0.0 %

Nota: Fuente (Arcila, 2018a)

Se puede concluir fácilmente que la Empresa petrolera Ecopetrol ha sido en cierta manera la pionera en la perforación colombiana; sin embargo, en los últimos 20 años han surgido en Colombia empresas perforadoras de pozos para distintos propósitos, entre los cuales se encuentra la extracción de agua en lugares de difícil acceso.

De igual manera, existen empresas como Soluciones Globales Calderón LTDA (SGC), las cuales fueron creadas con el fin de satisfacer la demanda de obras de saneamiento básico,

obras civiles y consultorías ambientales para la ejecución de proyectos encaminados a satisfacer de agua de buena calidad y constante las diferentes actividades de tipo comercial, industrial, agrícola, urbanístico y de recreación, para el desarrollo de los diferentes proyectos. Esta empresa cuenta, con equipos propios, mano de obra calificada y experiencia en la gestión ambiental de permisos para la exploración, concesión de aguas subterráneas, instalación de plantas de tratamiento, permisos de vertimientos, tanques elevados y demás servicios necesarios para el desarrollo de proyectos de mediana y gran escala a nivel nacional (SGC, 2020).

La *Figura 4* muestra una máquina perforadora típica capaz de hacer pozos profundos para la obtención de agua subterránea por el método de rotación directa. Su capacidad de perforación oscila entre 0 a 1.000 metros de profundidad con diámetros desde 4 pulgadas hasta 36 pulgadas.



Figura 4. Máquina perforadora de pozos de agua.

Fuente:(SGC, 2020)

Como se puede evidenciar existe a nivel nacional un marco general en lo que compete a la perforación con distintos fines de extracción. De manera similar, existen un gran número de empresas de origen colombiano- Nacional como: Perforaciones IDC, Arturo Lizarazo y Cía., Andina Pozos Ltda., Perforaciones Manantial, Acuíferos S.A.S., Pozos Colombianos S.A.S., Pozos san Sebastián S.A.S., etc.; dedicadas a la perforación, operación y mantenimiento de pozos de agua, su tratamiento y distribución de aguas subterráneas.

Por otra parte, distintas universidades han desarrollado proyectos encaminados al estudio de la perforación de suelos para la extracción de agua. De esta manera, un trabajo de investigación elaborado por estudiantes de la Universidad Industrial de Santander (Corredor & Bayona, 2017) especifica que la longitud máxima de perforación en su estudio corresponde a 100 metros con tubería en acero tipo SCH80 de 2 pulgadas de diámetro. En su estudio, la base de perforación se montó en una transmisión de diferencial de un vehículo Chevrolet luv 2300, se utilizó un motor de 22 hp a 3600 rpm, para el accionamiento hidráulico se seleccionó un bomba centrífuga IHM de 3 pulgadas en succión con descarga de referencia 30A-L2 de eje libre con una capacidad de 10 HP, un reductor de velocidad marca Radicon con una relación de 20:1 para una capacidad de 14 HP planificado en el eje de entrada del sistema.

De esta forma se traen distintos avances en la perforación Mundial de pozos que nos permitirán moldear y caracterizar nuestro diseño y estudio basado en fines existentes desde hace décadas en cuanto a la perforación respecta.

2.1.3 Antecedentes Históricos a Nivel local. Actualmente en la Ciudad de Ocaña no se encontró material literario que evidencie el estudio de perforadoras para la extracción de agua.

2.2 Marco Contextual

La investigación a realizar está enmarcada al diseño de una plataforma de perforación Hidráulica hacia sectores rurales que no cuentan con la extracción del recurso hídrico para fines agrícolas, Ganaderos, comerciales, y demás; el escenario primordial que caracteriza el proyecto está situado en la provincia de Ocaña, sur del departamento Norte de Santander.

2.2.1 Localización y características del lugar a aplicar. La provincia de Ocaña se sitúa a 8° 14' 15" con una Latitud Norte y 73° 2' 26" Longitud Oeste. El municipio ocupa una superficie de 460 km², los cuales representan el 2.2% del departamento. La Provincia de Ocaña tiene un área de 8602 km², con una altura máxima de 2065 m sobre el nivel del mar y una mínima altura de 761 m sobre el nivel del mar.

2.2.2 División Política de la provincia. Ocaña cuenta con 18 corregimientos los cuales son: Cerro de las Flores, Quebrada de la Esperanza, Las Chircas, Agua de la Virgen, Buenavista, Mariquita, El Puente, Las Lizcas, Espíritu Santo, El Palmar, Venadillo, Llano de los Trigos, Aguas Claras, La Floresta, Portachuelo, Otaré, Pueblo Nuevo y La Ermita.

El departamento limita al Sur con el municipio de San Martín (Departamento del Cesar) y con el municipio de Ábrego; al Norte con el municipio de Gonzáles (Departamento del Cesar) y con los municipios de Teorama, Convención y El Carmen.; al occidente con el municipio de Río

de Oro (Departamento del Cesar) y al Oriente con los municipios de San Calixto, La Playa y Abrego (DAG Ingeniería S.A.S., 2014).

A continuación, la *Figura 5* muestra la división provincial del Municipio de Ocaña, sus localidades y sus divisiones.



Figura 5. Mapa Político de la Provincia de Ocaña.

Fuente: (DAG Ingeniería S.A.S., 2014)

La provincia de Ocaña tiene diversas actividades económicas; la producción agrícola, la producción pecuaria ganadera, entre otras, las cuales usan diversos porcentajes de agua para su funcionamiento; nuestro proyecto busca una solución amena en aquellos lugares de difícil acceso de la provincia en cuanto a la extracción y búsqueda del recurso hídrico.

2.2.3 Hidrología de la Región. La provincia de Ocaña tiene cuencas de agua que nacen en la cordillera central ubicada hacia el sur. Así mismo, está cubierto por dos ríos importantes, lo que permite realizar diversas labores de agricultura y uso potable.

El Río Catatumbo o río algodonal. Tiene una longitud de 45 km desde su nacimiento hasta su desembocadura. Nace en una rama de la cordillera oriental del Municipio de Abrego llamado como la María, de ahí parten dos corrientes; la oriental de nombre Doradillas convirtiéndose en el río Oroque. De igual manera se encuentra la rama occidental llamada Chorreras dando al río Frío; estas dos ramas se vierten con rumbos sur – norte internándose al centro del departamento (región Catatumbo)

El Río Tejo. Tiene una longitud aproximada de 20 km recorridos por todas las aguas de la depresión Ocañera; Durante varios siglos pasados fue la principal fuente de agua potable.

Existen un gran número de quebradas, aunque por lo general se secan en determinadas épocas del año. Entre las más importantes se tiene; La Cagona (recibe este nombre ya que sobre ella recibe todas las aguas negras de Ocaña) y desemboca en el Río Chiquito, con una extensión de 4 km que rinde su caudal al río Tejo. La quebrada del Estanco formándose en su recorrido por una serie de cañones angostos que no permite que sus aguas sean utilizadas para la agricultura. Otras como la Quebrada de Venadillo (extensión de 5 km), La quebrada de La Vaca (3 km) y La Quebrada Seca con 2 km (DAG Ingeniería S.A.S., 2014).

La *Figura 6* da a conocer el mapa donde muestra la hidrología Ocañera, se observan sus principales ríos y quebradas como ramificaciones que conllevan pequeñas masas que transportan el preciado líquido de cuencas hasta tierra producidas por nuestros campesinos y labriegos.

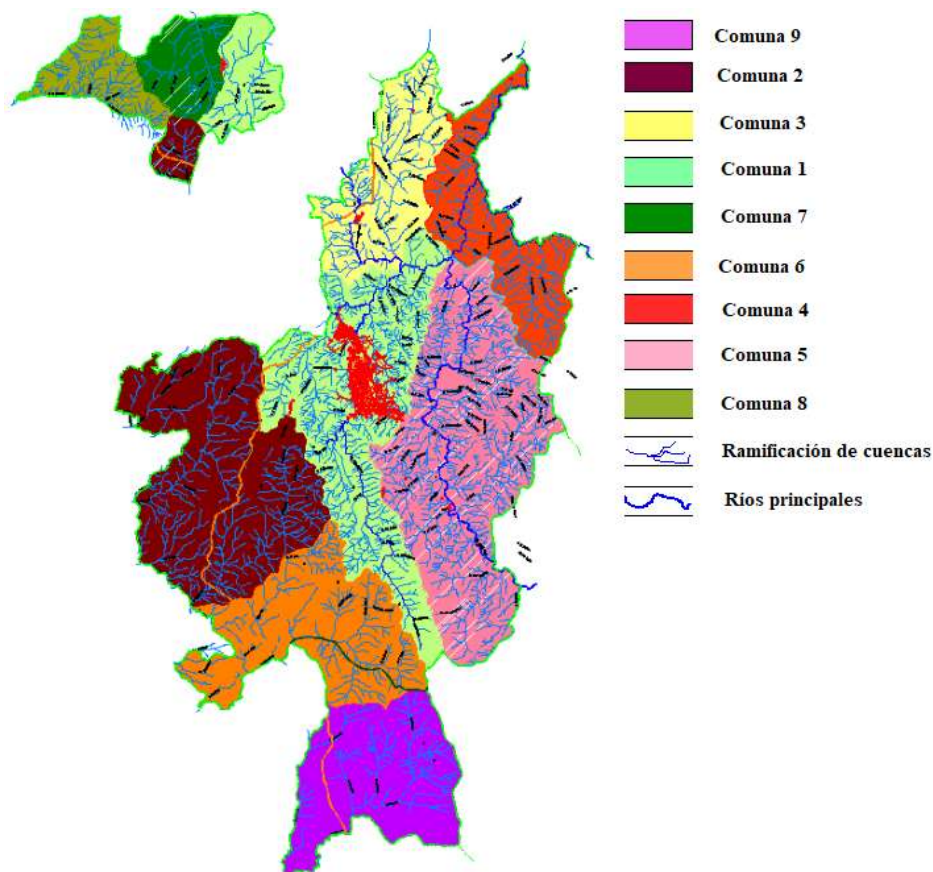


Figura 6. Hidrología de la región.

Fuente: (DAG Ingeniería S.A.S., 2014)

Ocaña cuenta con una temperatura promedio de 22°C, posee un Piso térmico templado, con una temperatura no menor a los 8°C y no mayores a los 25°C. Las Precipitaciones tienen valores entre los 1000 y 2000 mm anuales y las lluvias durante el primer semestre son escasas. Los meses en que cae la lluvia son, agosto, septiembre, octubre y noviembre, siendo este último

aprovechado para los cultivos semestrales en la agricultura como la cebolla, el tomate, el fríjol, el maíz y demás (DAG Ingeniería S.A.S., 2014).

2.2.4 El recurso del Agua en Colombia. La riqueza hídrica del país es extensa y favorable para fines de agricultura y cría de animales. El recurso hídrico se ve representado en la extensa red superficial de aguas que permiten el almacenamiento de aguas subterráneas, y en la existencia de un importante número aguas estancadas en lagos y pantanos, al igual que enormes extensiones de humedales (Sepúlveda, 2019).

Colombia, sin lugar a dudas, es uno de los países de sur américa que ocupa el primer lugar lo que compete a cantidad de agua. Según información de la UNESCO, en Colombia llueve tres veces más que en el resto del mundo ya que la precipitación mundial es de 900 mm anuales y sólo en Suramérica llega a los 1600 mm al año. La siguiente tabla (**Tabla 3**) muestra los valores de precipitaciones, escorrentía y evaporación por año, siendo Colombia el portador de un valor importante a nivel mundial y latinoamericano.

Tabla 3. *Precipitaciones en el mundo, Sur América y Colombia*

	Mundial	Sur América	Colombia
Precipitación	900 mm/año	1.600 mm/año	3.000 mm/año
Escorrentía	47.000 km/año	11.668 km/año	2.112 km/año
Evaporación	580 mm/año	940 mm/año	1.150 mm/año
	101/s km²	211/s km²	581/s km²

Nota: Fuente (Camilo Sanchez Ortega, 2018)

Gracias a la posición geográfica y a la presencia de tres cordilleras que cruzan por Colombia, cuenta con un valor en la precipitación de 3000 mm/año favoreciendo varios aspectos; sin embargo, lo primordial es la ventaja de contar con dos áreas marinas bastante considerables.

Colombia Indudablemente es un país con un índice de precipitación alto que lo ubica en la región privilegiada ante otros países. Cuenta con grandes vertientes de agua: el mar Caribe, el océano Pacífico, el río Orinoco y el río Amazonas, así mismo, con el nacimiento del Catatumbo, mediante el cual se mantiene a la provincia de Ocaña. El departamento Norte Santandereano se ubica como principal región dotada por este recurso. Esta situación de contar con grandes caudales de este recurso hídrico permite posicionar al país en situación económica, política y social por encima de aquellos países que no cuentan con recursos suficientes (Sepúlveda, 2019).

Colombia es uno de los países con mayor número de recursos hídricos a nivel mundial. Se encuentran seis tipos de aguas, incluyendo aguas lluvias, aguas subterráneas, aguas termo minerales, aguas superficiales, aguas marinas, oceánicas y aguas de alimentación glacial. Estas vertientes generan un valor de caudal promedio de $66440 \text{ m}^3/\text{s}$, dando a un volumen anual de 2.113 km^3 , representando la región caribe el 23%; la región Pacífico el 10%; la zona de la Amazonia el 34%; la Orinoquía el 32% y la región del Catatumbo sólo el 1% (Sepúlveda, 2019).

2.3 Marco Conceptual

A continuación, se presentan algunos conceptos básicos dentro de la investigación y el estudio de las plataformas hidráulicas de perforación para fines de extracción de aguas subterráneas.

2.3.1 Perforación de pozos. Se define a las perforaciones como el conjunto de trabajos para realizar excavaciones de sección redonda en la tierra o en una construcción, por medio de equipos técnicos especiales sin que haya acceso del hombre en dicho trabajo. En la *Figura 7* se

observa un equipo de perforación de alto nivel de trabajo; este equipo es utilizado para extraer crudo en bases petroleras.



Figura 7. Equipo de perforación, terminación o reparación, área industrial

Fuente:(Azcona, 2019)

2.3.1.1 Pozo y sondeo. *La Figura 8 representa un pozo y el sondeo realizado al suelo para la extracción de algunas sustancias a explotar.*

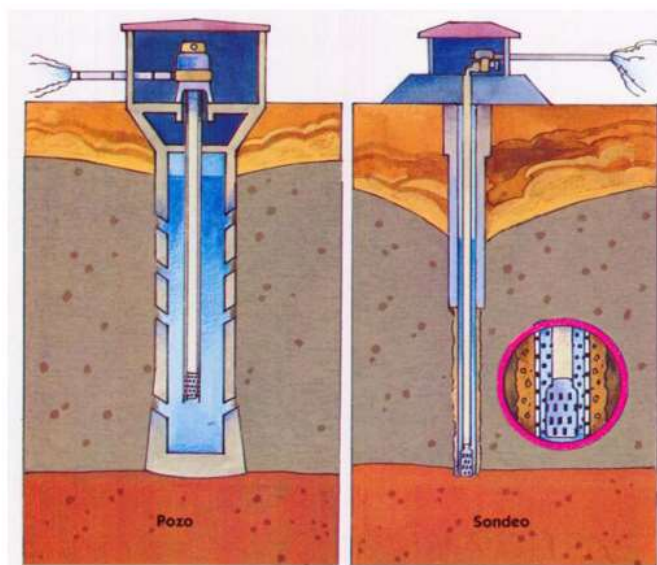


Figura 8. Pozos y Sondeos.

Fuente: (Ardila & Rodríguez, 2015)

Como se puede evidenciar, los pozos se fabrican con el fin de extraer los fluidos subterráneos. A menudo estos pozos son de diámetros mayores a 1 metro, alcanzando profundidades pequeñas de unos 10 a 15 metros aproximadamente. Mientras que los sondeos son estrechos y más profundos, llegando a los 500 metros en su profundidad. Cuando se utilizan para sacar el agua, se necesita instalar una motobomba con su respectiva tubería. La obra de captación se denomina una excavación hasta que se llegue a encontrar fluido. Los pozos se fabrican en su mayoría de ladrillo hueco o con aros de hormigón con orificios que permiten el paso del agua. Pocas veces se instalan una serie de tubos horizontales o radiales a modo de brazos, esto permite que el caudal aumente (Instituto Geológico y Minero de España).

2.3.2 Torre-Plataforma de Perforación. Una torre de perforación o plataforma de perforación permite sondear o perforar lo que comúnmente se conoce como pozos en la tierra. Muchas veces se realiza con la finalidad de encontrar líquidos como el petróleo, agua y gases. Existen grandes construcciones de plataformas en el mar abierto o relativamente pequeñas según sea el caso a explorar.

En la *Figura 9* se evidencia las dimensiones de las plataformas de perforación a mar abierto, véase la grandeza de la estructura y la base en su columna.



Figura 9. Plataforma de perforación más grande del mundo llamada pérdida.

Fuente: (Xataca, 2020)

2.3.3 Suelos. El suelo es aquella parte superficial terrestre activa, variada, se denomina también un recurso natural que se origina por los residuos sólidos de los seres vivos, alteraciones Físicas y químicas de las rocas o por otros procesos naturales (Pineda, 2019).

Existen diferentes tipos o clasificación de los suelos que juegan un papel vital para el desarrollo de cualquier actividad. La *Figura 10* muestra las diversas capas en la estructura del suelo.



Figura 10. Tipos de suelos.

Fuente: (Pineda, 2019)

Los suelos se clasifican según su estructura en:

Suelos arenosos: No aptos para la agricultura, poca materia orgánica y no absorben el agua.

Suelos Calizos: Ubicados en zonas secas o áridas, no son aptos para la agricultura; ya que poseen muchas sales calcáreas y de color blanco o pardo.

Suelos Humíferos: tienen gran materia orgánica, color oscuro, retienen el agua y buenos para el cultivo.

Suelos Arcillosos: absorben el agua formando charcos, con humus que son buenos para el cultivo y con numerosos granos amarillentos.

Suelos Mixtos: poseen características entre los arenosos y los arcillosos mezclados (Pineda, 2019).

En la *Figura 11* se muestra la clasificación del suelo según su estructura y características físicas en la observación:

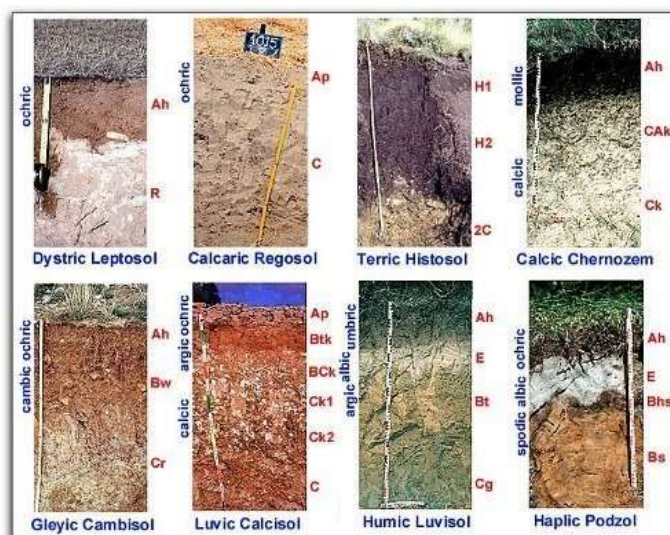


Figura 11. Clasificación del suelo según la estructura.

Fuente: (Pineda, 2019)

2.3.4 Reductor de Velocidad. El reductor es la máquina compuesta por varios o un solo par de engranes que están montados en lo que denomina reductor de velocidad. Permite que tanto los motores eléctricos, explosión u otro, funcionen a diferentes velocidades adaptándose al fin en que fueron diseñados (Teresa transmisiones, 2017).

2.3.5 Polea. Es una maquina simple o dispositivo mecánico de tracción que transmite una fuerza; también sirven para reducir las magnitudes de la fuerza que se necesita para mover un cierto peso de un lugar a otro.

2.3.6 Manivela. Es una especie de palanca con un punto al eje de rotación y la otra en la cabeza de la biela. Cuando la biela se mueve de forma alternativa (adelante y atrás), se consigue el giro de la manivela gracias al movimiento general de la biela.

2.3.7 Eje de transmisión. Es un eje diseñado en esencia para transmitir la potencia, constituye una parte fundamental de las transmisiones mecánicas (Martínez., 2016).

2.3.8 Malacate. Como se observa (*Figura 12*) un malacate es un conjunto de componentes de propulsión mecánica que proporciona fuerza de transmisión, está compuesto por un rodillo o cilindro giratorio que se impulsa por la acción manual, animal o mediante una máquina.



Figura 12. Malacate manual.

Fuente: (Ingecad, 2020)

2.3.9 Motor Hidráulico. Son motores que transforman la energía cinética del fluido en energía rotativa, la cual generalmente se aplica a una carga mediante un eje. Todos los motores hidráulicos tienen características de diseño muy similares; poseen una superficie de accionamiento sujeta a presión

diferencial, una manera de sincronizar la conexión entre el fluido a presión hacia la superficie de presión para lograr una rotación continua y una conexión mecánica entre esta superficie y el eje.

2.3.10 Bomba de lodo. Este dispositivo es un bomba independiente que sirve para “bombear” lodo hasta el interior de la sarta de perforación y de esta manera extrae los pedazos de la tierra y piedra; resultados de la perforación (Mosquera & Haro, 2018).

2.3.11 Barrena de Perforación. Barrena es la herramienta de corte localizada en el extremo inferior de la sarta de perforación que se utiliza para cortar o triturar la formación durante el proceso de la perforación rotaria. La *Figura 13* muestra barrenas típicas utilizadas en la perforación de suelos, clasificadas como: A) Barrenas tricónicas, B) Barrenas de cortadores fijos, y C) Barrenas especiales (Juarez, 2019).



Figura 13. Barrenas de perforación.

Fuente: (Geoproductos.es, 2020)

2.3.12 Sarta de perforación. Es la parte del equipo de perforación que está formado por medio de conexiones, su finalidad es transmitir la rotación y el torque desde la mesa rotatoria (top drive). Además, permite el transporte del fluido de perforación a la barrena. La sarta está

sometida a diversos esfuerzos (tensión, compresión, presión interna y externa, Fatiga, torsión y abrasión), los cuales deberán ser inferiores a su esfuerzo de diseño. De manera general, son herramientas ubicadas entre la barrena y la tubería de perforación. Además sirve como enlace mecánico entre los sistemas (Juarez, 2019).

Una sarta de perforación no es más que el conjunto de perforación donde se constituye la tubería y la broca que realiza el primer trabajo (*Figura 14*), donde se dan los componentes importantes de la sarta.

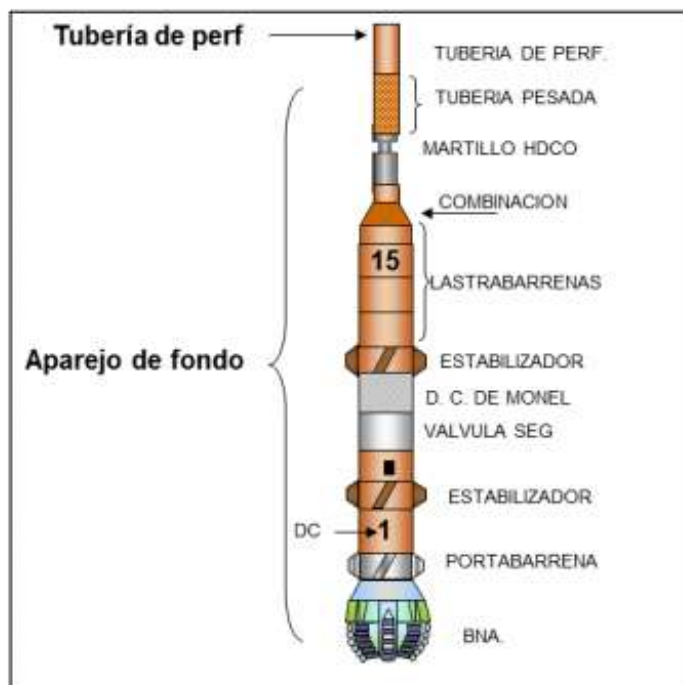


Figura 14. Sarta de perforación.

Fuente: (Enrique, 2013)

2.3.13 Tubería de Perforación. Constituye la mayor parte de la sarta de perforación, está soportada en su extremo superior por la flecha o sustituto de flecha. Transmite potencia por medio del movimiento de rotación en el piso de perforación a la barrena y permite que el lodo

circule. Está constituida por dos partes mediante soldadura, el cuerpo y la conexión. Esta tubería de perforación se encuentra sujeta a esfuerzos como todo el resto de la sarta de perforación (Juarez, 2019).

2.3.14 Unión Giratoria (Swivel). Es un componente mecánico del sistema rotatorio que tiene tres funciones básicas: soportar el peso de la sarta de perforación, permitir que la sarta gire durante el proceso de perforación y proveer un sello hermético durante el bombeo del fluido a presión a través del interior de la sarta (Juarez, 2019).

2.3.15 Martillo. El propósito de un martillo en la perforación es asistir en la liberación de la sarta de perforación cuando queda atrapada. Esta herramienta se utiliza cuando la sobretensión está limitada por la capacidad de la barrena o por la resistencia de la tubería de perforación o no exista suficiente peso en la sarta de perforación para empujar la sarta libre de la sección atrapada. Básicamente un martillo permite que la sarta de perforación estire y después convierta esa energía en una fuerza dinámica que actúa sobre la sección atrapada de la sarta de perforación, empujándola o tensionándola para liberarla (Juarez, 2019).

2.3.16 Vástago de Perforación. Es una barra de acero larga, que puede ser cuadrada o hexagonal, con un orificio perforado en el centro que provee un trayecto al fluido. Transmite el movimiento rotativo desde la mesa rotatoria o el buje del vástago a la sarta de perforación durante la rotación (Autores del Schlumberger Oilfield, 2020).

2.4 Marco Teórico

En esta sección de la investigación se verá aquellas teorías de perforación que existen en la actualidad, lo que permitirá analizar sus características y su influencia en los estudios de diseño y simulación.

2.4.1 Generalidades de perforación. Esta etapa del procedimiento, dos movimientos principales son cubiertos, percusión y rotación. A continuación, se definen algunos conceptos básicos asociados a estos.

2.4.1.1 Perforación por Percusión. Es el tipo de perforación más sencillo que da a la herramienta un movimiento alternativo de traslación por transmisión mediante un cable. La herramienta se levanta mecánicamente y al caer rompe el suelo de manera paulatina mediante impactos repetidos. Simultáneamente una baja torsión hace que la herramienta gire mediante la torsión del cable. El movimiento alternativo de traslación es dado por un balancín a razón de 40 a 80 golpes por minuto según corresponda la naturaleza del terreno. Este equipo trabaja en seco extrayendo los fragmentos del suelo mediante cucharas o baldes (Mosquera & Haro, 2018).

El movimiento de percusión es complejo porque se ve influenciado por la viscosidad del lodo, la forma de la herramienta, el rozamiento de las paredes, entre otros aspectos. Además, está regulado por factores como la amplitud del movimiento, su velocidad (Número de golpes por minuto), la elasticidad del cable (absoluta según su longitud desarrollada), el peso y la forma de la herramienta (Mosquera & Haro, 2018).

En la *Figura 15* se describe el comportamiento de la perforación por percusión, se observa el comportamiento del balancín y del trepago permitiendo que este último tenga una mayor longitud al pasar cierto tiempo de operación.

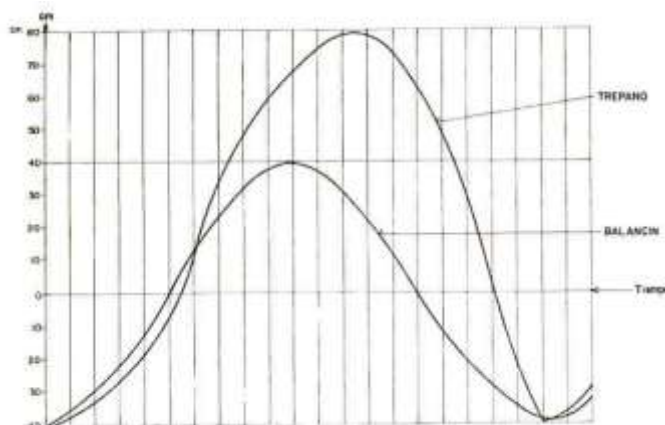


Figura 15. Curvas descritas por el balancín y el trepago.

Fuente: (hidrogeologiaypozos.blogspot, 2017)

Se nota que tanto el trepago como el balancín realizan su trabajo al mismo tiempo, no obstante, el primero lo hace con una mayor longitud, aproximadamente a 78 cm, mientras que el Balancín alcanza los 40 cm.

La perforación por percusión es utilizada en su mayoría para realizar estudios y análisis de suelos en empresas que realizan análisis Geotécnico permitiendo dar información sobre el terreno.

La *Figura 16* muestra una maquina simple para realizar perforación de pozos mediante el método de percusión, nótese el motor y el sistema de engrandes que permiten que el trépano caiga al suelo mediante el cable.

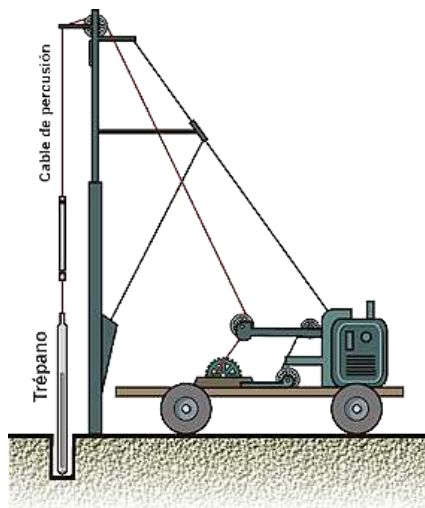


Figura 16. Perforación por percusión.

Fuente: (Ramirez et al., 2013)

El movimiento descrito se produce en un espacio de tiempo muy corto y al destruir en cada golpe una determinada parte de la formación rocosa que se perfora, habrá que aumentar paulatinamente la longitud del cable para que la herramienta siga golpeando el frente de avance. Si la longitud del cable que se da a la herramienta es excesiva, la altura de caída libre de la herramienta se reduce, pues parte del movimiento del balancín se emplea en recoger el exceso de cable en el sondeo y entonces el rendimiento del avance disminuye de una manera extraordinaria.

2.4.1.2 Perforación por Rotación. Estos equipos (*Figura 17*) se caracterizan porque trabajan girando o rotando una broca o trépano perforador. El sentido de la rotación debe ser el mismo usado para la unión o enrosque de las piezas que constituyen la sarta de perforación. Todas las brocas o trépanos son diseñados para cortar, triturar o voltear las distintas formaciones que pueden encontrarse a su paso. Estas herramientas son diseñadas para cada tipo de formación

rocoso o terreno. El trabajo de perforación se realiza mediante la ayuda de lodo de perforación el cual desempeña las siguientes funciones:

Evita el calentamiento de las herramientas durante la perforación.

Transporte en suspensión el material resultante de la perforación hacia la superficie del terreno.

Forma una película protectora en las paredes del pozo; la cual impide el desmoronamiento o el derrumbe del pozo (Mosquera & Haro, 2018).

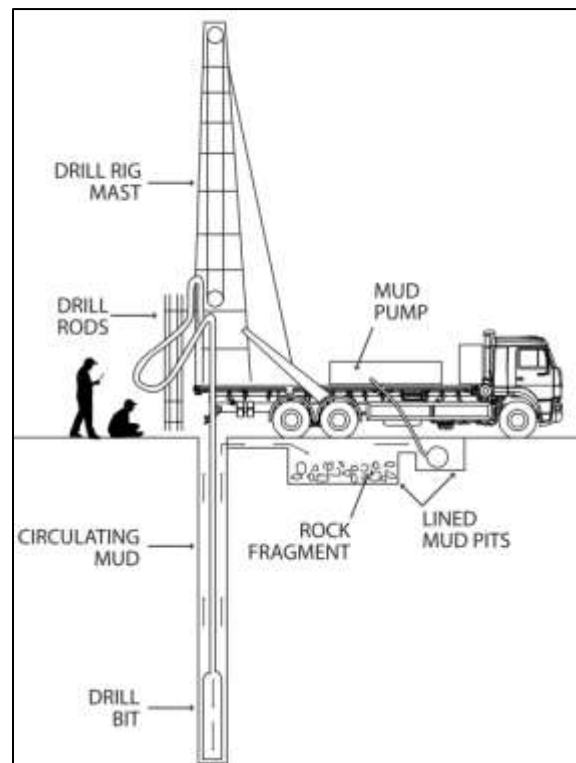


Figura 17. Perforaciones por rotación.

Fuente: (Guevara et al., 2010)

2.4.1.3 Perforación Rotaris. Como lo indica su nombre los rotaris son equipos de rotación rápida e inyección del lodo a alta presión. Es el dispositivo que en la actualidad se utiliza con más frecuencia. Su empleo se ha generalizado en las investigaciones geológicas, de petróleo y de minerales. La carga sobre la herramienta en el fondo del agujero es muy importante, en el orden de toneladas. Dicho peso emana de las barras (las cuales se añaden por encima del trépano); la presión expuesta en el trabajo de rotación se ajusta a las necesidades de trabajo en el lugar de exploración (Mosquera & Haro, 2018).

2.4.1.4 Perforación mixta (Percusión – Rotación). La percusión presenta ventajas en rocas muy duras y a poca profundidad; por el contrario, en presencia de terrenos blandos, arenas, arcillas; la rotación es más rápida y ofrece una mayor seguridad. Existen para ello aparatos mixtos equipados para trabajar ya sea en rotación o a percusión (Mosquera & Haro, 2018).

2.4.1.5 Perforación Manual. La perforación manual de pozos profundos se realiza mediante una técnica que es muy rápida; esta combina los sistemas de rotación y percusión, donde el origen de la fuerza motriz es la fuerza humana respectivamente de los operadores o perforadores (Mosquera & Haro, 2018).

En la *Figura 18* se observa un mecanismo tradicional que se compone mediante una bomba de pedal accionada mecánicamente, la estructura de perforación, la herramienta de corte y el flujo del líquido que extrae la succión de la bomba.

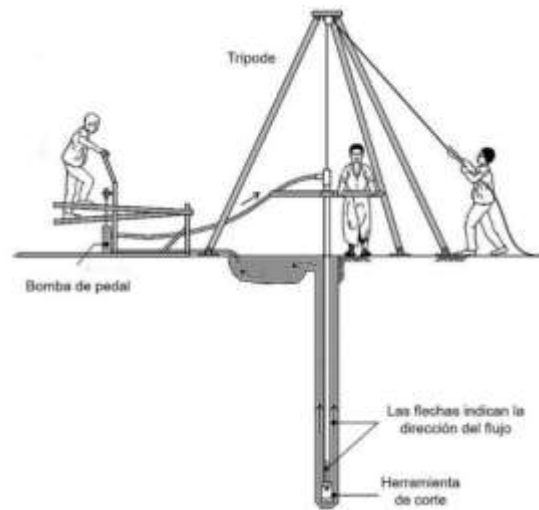


Figura 18. Perforación Manual.

Fuente: (Worth, 1998)

Esta figura representa la manera como se hacían los trabajos de perforación por rotación. En la mayoría de los casos estos pozos se realizaban con el fin de extraer agua de suelos subterráneos en áreas de pobres, áridas y en vías de desarrollo. Las herramientas de corte y la tubería de transporte se fabricaban en ocasiones con plantas de bambú.

2.5 Marco Legal

Las bases legales que sustentan este proyecto están contempladas en decretos impartidos por el Gobierno Colombiano y en Normativas Internacionales de perforaciones de pozos.

2.5.1 Decretos Nacionales

2.5.1.1 Decreto 328 del 28 de febrero de 2020 (Yacimientos no convencionales)

Artículo 2.2.1.1^a.1.1. Tiene como objetivo fijar los lineamientos para adelantar los proyectos piloto de investigación integral- PPII sobre Yacimientos no convencionales- YNC de hidrocarburos con la utilización de la técnica de fractura miento Hidráulico multi etapa con perforación Horizontal -FH-PH. (Ministerio de Minas, 2020)

2.5.1.2 Norma Técnica Colombiana (NTC) 5539 (Pozos profundos de agua). El propósito de esta norma es brindar los requisitos mínimos para la construcción de pozos profundos de agua subterránea, sin modificar las condiciones de los acuíferos y su calidad de agua (Icontec, 2016).

2.5.2 Normativas Internacionales

2.5.2.1 Normativa internacional API 5L, API5B, API5CT, API5D. Las normas API están diseñadas para la industria del petróleo y gasolina según los requisitos de la legislación y el medio ambiente. Según API, industria de petróleo y gas natural puede tener las normas de referencia sobre su industria.

2.5.1.2 NS-1 TM - Requisitos de calidad e inspección para los equipos de perforación y terminación de pozos. NS-1 TM fue desarrollado originalmente por Shell durante un período de 10 años, Para mantener el compromiso con su desarrollo, así como para entregarlo a una audiencia de perforación más amplia, se pasó a Fearnley Procter, quien ahora tiene la propiedad total.

Continúa desarrollándose como un sistema de recarga para API, para permitir una respuesta rápida a nuevos tipos de equipos, nuevos entornos de perforación y nuevos tipos de fallas (Fearnley Procter Group, 2018)

Capítulo 3. Diseño Metodológico

3.1 Metodología de la Investigación

El desarrollo de esta propuesta se encuentra enmarcada dentro de la metodología investigación aplicada, la cual trata de responder a interrogantes o problemas concretos que se presentan al investigador, con el objetivo de encontrar soluciones factibles o respuestas acertadas que se puedan aplicar de manera inmediata en los contextos o situaciones específicas.

De esta manera, el desarrollo de esta propuesta comprende una serie de fases que permiten dar solución al problema planteado.

3.1.1 FASE I: Revisión Literaria. La primera fase abarca un estudio exhaustivo de la literatura que permitirá conocer las tendencias y tecnologías utilizadas en la perforación de pozos, y las características de los diferentes tipos de suelos. Esta fase ayudará a dar respuesta al primer objetivo planteado en este proyecto. Así mismo, permitirá determinar trabajos similares en el campo de la perforación de pozos que serán fundamento teórico para las fases posteriores del estudio. Similarmente, esta fase delimitará las condiciones del suelo a tener en cuenta en el diseño de elementos de perforación.

3.1.2 FASE II: Tecnologías de perforación. La segunda fase, parte de la fase anterior y se enfoca en la comparación de las tecnologías de perforación de pozos, lo que permitirá delimitar el alcance de la propuesta. Con los resultados de la fase anterior, en ésta se prevé una

comparación entre tecnologías de perforación que permita explorar opciones y parámetros de construcción y diseño que sirvan para el alcance de este estudio.

3.1.3 FASE III: Cálculo y Diseño de la Plataforma. Por último; en esta tercera fase se enfoca el estudio al diseño y cálculo de la solución planteada en esta propuesta. Análisis mediante simulación y formas analíticas permitirán evaluar la solución planteada acorde a los requerimientos de diseño. Con base en los resultados de las fases anteriores, en ésta se unen y se desarrollará la solución planteada.

Capítulo 4. Cálculo, Análisis y Diseño de la plataforma

Se muestra en esta sección los resultados de estudio relacionados en las fases I, II y III del desarrollo metodológico propuesto. La primera parte de este capítulo se enfoca en publicaciones realizadas en el área de perforación de pozos. La información se resume en una tabla con los resultados más relevantes de cada publicación. Por otra parte, se realiza un análisis comparativo de las tecnologías de perforación de pozos de agua, siendo alternativas de diseño. En esta parte del proyecto se realizaron cálculos junto con toma de decisiones en aquellos parámetros que al final caracterizan la plataforma. Así mismo se realiza una simulación de esfuerzos y posibles modos de funcionamiento del sistema en cuestión.

4.1 Investigaciones relevantes sobre las plataformas hidráulicas de perforación

A continuación, se muestra una recopilación de algunas investigaciones con resultados relevantes sobre las distintas plataformas de perforación existentes. Esta parte permite el desarrollo de la fase I de la sección 3.0, la cual comprende el estudio y análisis de la literatura permitiendo identificar tendencias y tecnologías utilizadas en la perforación de pozos, y las características de los diferentes tipos de suelos.

A pesar de que las investigaciones documentadas no son estrictamente vigentes, estas tienen mucho valor para ayudar en el desarrollo en el diseño que combina al menos los principios usados. Se contraponen de referencia; artículos, tesis, libro y trabajos de investigación, como se puede evidenciar en la **Tabla 4**.

Tabla 4. Revisión de literatura en relación a estudios de perforación.

Publicación	Descripción	Resultado	Análisis Realizados
<p>Artículo Dynamical mechanics behavior and safety analysis of deep-water riser considering the normal drilling condition and hang-off condition Fuente. (Mao et al., 2020)</p>	<p>Modelo de análisis dinámico para el tubo ascendente de perforación, Riser es una tubería que conecta la plataforma de perforación y el cabezal de pozo submarino.</p>	<p>La distribución del desplazamiento lateral y la tensión de la contrahuella aumentan con la velocidad actual y la distancia de desplazamiento de la plataforma.</p>	<p>Fue discretizado por el método de elementos finitos (interpolación de hermite) y resuelto por el método β de Newmark. La exactitud de este modelo se verificó mediante un experimento. Modelo de análisis mediante esfuerzos de Von Mises, deformaciones</p>
<p>Artículo The Development of Deep Borehole Permanent-magnet Motor Direct Drive Top-Driving Drilling Rig Fuente. (Liu & Ran, 2014)</p>	<p>Desarrollo del motor de conversión de frecuencia de imán permanente de alta potencia. Es posible desarrollar la plataforma de perforación de accionamiento superior de accionamiento directo con motor de imán permanente.</p>	<p>Casi toda la plataforma de perforación de petróleo en alta mar ha sido equipada con el dispositivo de transmisión superior. En el diseño de un nuevo tipo de plataforma de perforación del terreno, también se ha considerado el dispositivo de propulsión superior.</p>	<p>El motor de imán permanente impulsa directamente el cabrestante, sin transmisión de engranajes, por primera vez en una plataforma de geo perforación adopta un cabrestante de línea discontinua doble, durante la ejecución en el orificio y la extracción del orificio, se puede realizar una regulación de velocidad continua.</p>
<p>Artículo Diseño de un sistema cementante para pozos utilizados en el anclaje de plataformas de producción en aguas profundas, Rio de Janeiro, Brasil Fuente. (Mavares & Pertuz, 2013)</p>	<p>Se desarrollaron sistemas cementantes para aplicación Costa afuera con una resistencia compresiva mayor a 2500 psi, en profundidad de agua de 1400 m y temperatura del suelo marino de 40 °F.</p>	<p>Se observa una temperatura de superficie de 80 °F, se evidencia un intercambio de calor con la profundidad de agua, al final cambia su tendencia, debido al gradiente geotérmico del pozo. El primer saco se calienta alrededor de 4 °F</p>	<p>Se utilizaron 34 diseños de sistemas cementantes, teniendo como foco los estudios realizados en sistemas de tecnología de distribución de partículas, variando algunos aditivos.</p>
<p>Artículo Study on the static behavior of installing a deep-water drilling riser on a production platform Fuente. (Tian et al., 2020)</p>	<p>La deflexión estática del tubo ascendente de perforación durante la instalación está muy sobre estimada en trabajos anteriores.</p>	<p>Este documento construyó un modelo de tubo ascendente doble en el que dos tubos ascendentes están dispuestos en tándem</p>	<p>Se consideran una viga de Bernoulli sujeta a una corriente oceánica constante.</p>
<p>Artículo Design of A Portable Hydraulic Water Borehole Drilling Rig Fuente. (Dienagha et al., 2013)</p>	<p>En Nigeria, el suministro de agua se ha convertido en un problema político grave, mientras que las tuberías permanecen secas en la mayoría de las ciudades. Las consecuencias son que Los hogares de los vecindarios operan sus propios</p>	<p>El equipo de perforación hidráulico diseñado cumple con todos los objetivos de diseño. Específicamente, el diseño tiene una ventaja económica significativa sobre las plataformas de perforación importadas. Su fabricación en Nigeria</p>	<p>La plataforma debe ser: Capaz de perforar pozos de hasta 150 mm de diámetro; Capaz de perforar pozos hasta una profundidad de 500 resistente y confiable; Sencillo y fácil de mantener.</p>

	sistemas de agua; otros compran agua a los vendedores ambulantes, etc.	también impulsará el desarrollo tecnológico necesario de Nigeria.	Suficientemente liviano para ser montado en un camión de 4 × 4 ruedas de cinco toneladas para un fácil acceso a los diversos terrenos del Delta del Níger y otras regiones del país; La plataforma debe ser rentable en comparación con las plataformas de perforación complejas importadas.
Artículo Development and Performance Evaluation of a Mechanized Hand Borehole Drilling Rig in Submerged Areas of Nigeria Fuente. (Lizarazo, 2015)	La tecnología tradicional implica el uso de humanos para operar una herramienta de perforación que penetra en el suelo mientras que los métodos modernos están automatizados, pero debido al alto costo de los materiales de perforación, el método tradicional se usa ampliamente para la perforación de pozos	Se desarrolló una plataforma de perforación manual mecanizada con un mecanismo completo que involucra el movimiento vertical de la broca de perforación. Los componentes principales de la máquina son el tornillo de potencia, la unidad de transmisión de potencia (engranaje cónico de corona), la broca, el mango giratorio y el marco.	Muestra los distintos componentes y partes principales. Se introdujo la barrena de perforación debido a su idoneidad en suelos arenosos. La barrena está conectada de tal manera que aloja el tornillo de potencia y la longitud del tornillo de potencia y la broca es de 1000 mm para ambos
Artículo Design of A Portable Hydraulic Water Borehole Drilling Rig Fuente. (Mavares & Pertuz, 2013)	Diseñar y producir equipos de perforación de agua efectivos y más baratos. En consecuencia, se ha diseñado una plataforma de perforación hidráulica de agua. El diseño satisface los requisitos de diámetro y profundidad de perforación y tiene una ventaja económica sobre los equipos importados.	se puede concluir que el equipo de perforación hidráulico diseñado cumple con todos los objetivos de diseño. Específicamente, el diseño tiene una ventaja económica significativa sobre las plataformas de perforación importadas. Su fabricación en Nigeria también impulsará el desarrollo tecnológico necesario de Nigeria.	En la región del delta del Níger, la contaminación por hidrocarburos se ha vuelto peligrosa para el consumo, el agua de los ríos, el agua de lluvia y el agua de los acuíferos poco profundos. Esto requeriría que las plataformas de perforación de agua fueran lo suficientemente resistentes para soportar las diferentes formaciones rocosas y los requisitos de profundidad.
Artículo Working Performance Analysis and Optimization Design of Rotary Drilling Rig under on Hard Formation Conditions Fuente. (Luo et al., 2014)	Se analizaron estos problemas existentes para el cabezal de potencia, la tubería de perforación, etc. del dispositivo de trabajo de la plataforma de perforación rotativa. El diseño de llave de transmisión combinada extraíble del cabezal de perforación de la plataforma de perforación	las partes críticas del dispositivo de trabajo de la plataforma de perforación rotatoria se mejoran y optimizan el diseño, incluido el diseño de la llave de accionamiento combinada extraíble, el diseño del sello giratorio dispositivo de transición, diseño de optimización del amortiguador, diseño del	Análisis de fallas comunes y su razón de la plataforma de perforación rotatoria en condiciones de formación dura, se diseñó un dispositivo de transición de sello giratorio. La plataforma de perforación rotativa tipo Xugong XR280D después de la optimización y mejora, perforó con éxito los

	rotatoria y el diseño del dispositivo de transición de sello giratorio que se adapta para perforar la formación dura presentan la innovación.	dispositivo de protección del cojinete giratorio y diseño de optimización de la llave de la tubería de perforación.	pozos de los pilotes de roca para una profundidad de 80 m, el diámetro del pozo es de 2 m en 4 bloques, en la autopista Qinghai, provincia de Guizhou.
Artículo Design of A Portable Hydraulic Water Borehole Drilling Rig Fuente. (Dienagha et al., 2013)	Diseño de una plataforma de perforación hidráulica de agua. El diseño satisface los requisitos de diámetro y profundidad de perforación y tiene una ventaja económica sobre los equipos importados.	De lo anterior se puede concluir que el equipo de perforación hidráulico diseñado cumple con todos los objetivos de diseño. Específicamente, el diseño tiene una ventaja económica significativa sobre las plataformas de perforación importadas.	Ser capaz de perforar pozos de hasta 150 mm de diámetro; Capaz de perforar pozos hasta una profundidad de 500 m; Resistente y confiable; Simple y fácil de mantener. Lo suficientemente liviano para ser montado en un camión de 4 x 4.
Artículo Desing, construction and evaluation of a digital hand pushed penetrometer Fuente. (Rezaee, 2017)	Un penetrómetro de cono se utiliza ampliamente en la investigación de la labranza y la movilidad fuera de la carretera como indicador de las características de resistencia y densidad del suelo.	La curva de calibración de voltaje mostró una relación lineal muy buena entre potencia y voltaje. Fue despreciable de una manera que el residuo registrado para la deformación se obtuvo como promedio de 32.3 micrones.	El uso de penetrómetros equipados con un sistema de adquisición de datos permite realizar mediciones de alto volumen de forma rápida y sencilla.
Tesis Diseño y simulación de perforador hidráulica para pozos de agua Fuente. (Málaga, 2013)	Esta tesis consiste en diseñar una perforadora hidráulica que pueda ser empleada en la construcción de pozos en la región de Piura, así como en otras regiones agrícolas del país, con un diámetro promedio de 60.33 mm y con un alcance máximo de 150 m de profundidad.	Se utilizó el software SolidWorks Simulación se realiza la modelación de todos los componentes Finalmente se presentan los costos y los planos de descripción, con el objetivo de presentar una máquina de menor costo, comparado con las maquinas comerciales de similar capacidad, y de fácil ensamblaje.	Se realizaron análisis estructurales en el diseño de la perforadora hidráulica, Para poder realizar un diseño eficiente de la máquina perforadora, es necesario conocer los parámetros o variables de operación del equipo. Las variables de operación inherentes al sistema, que inciden en su eficiencia (velocidad de penetración)
Tesis Guía Básica e construcción de pozos profundos en Colombia Fuente. (Lizarazo, 2015)	Realizar una guía básica para la construcción de pozos profundos de pequeño diámetro en Colombia; como una solución alternativa y más usual, a los problemas de abastecimiento del agua, en zonas rurales y dispersas del país; basado en las Normas Técnicas Nacionales.	Aplicada esta guía para un pozo con una profundidad de 25 a 40 metros de profundidad, diámetros no mayores a 4 pulgadas de diámetro, puede aplicarse a pozos profundos con más de 90 metros de profundidad en suelos no consolidados	Este trabajo de investigación mantuvo su trabajo enmarcado al análisis en las brocas y en el sistema de bombeo pertinente en cada pozo perforado.

<p>Tesis Diseños y construcción de una unidad móvil de perforación para pozos de agua profundos de agua potable para la empresa perforaciones, montajes, equipos y suministros S.A.S Fuente. (Corredor & Bayona, 2017)</p>	<p>Se diseñó y construyó una unidad móvil de perforación para formar pozos profundos de agua potable para la empresa perforaciones, montajes, equipos y suministros S.A.S en el departamento de Casanare para contribuir con el suministro de agua potable en lugares aledaños a los municipios donde debido a diversos factores no alcanza a llegar esta valiosa fuente de vida</p>	<p>Se diseñó una unidad móvil de perforación para pozos profundos de agua con las siguientes condiciones de operación: Longitud máxima de 100 metros en tubería de perforación en acero tipo SCH 80 de 2 pulgadas de diámetro.</p>	<p>Se hizo un análisis por el método de elementos finitos mediante el software ANSYS® para la estructura dejando claro que está en perfectas condiciones para trabajar en el punto más crítico que es cuando está el máximo peso en operación. Así como también un análisis de volcadura para garantizar la seguridad en el momento del transporte y la operación del equipo hacia cualquier lugar de trabajo.</p>
<p>Tesis Diseño de sistemas de pozos para la captación de aguas subterráneas Fuente. (RODRÍGUEZ, 2015)</p>	<p>caracterización de la región de la Mojana, recopilación de información con respecto a métodos y tecnologías para la captación de agua subterránea y finalmente de un diseño de un pozo para la captación de agua subterránea en el acuífero del Morroa.</p>	<p>Se realizó la caracterización de la región de la Mojana teniendo en cuenta la población, el clima, la topografía, y demás aspectos que permitieron ampliar la información y el conocimiento sobre la zona de estudio.</p>	<p>En este documento se presentan algunas metodologías aplicadas en otros países para la extracción de agua del subsuelo, teniendo en cuenta la zona de estudio, la calidad del agua y las técnicas preliminares a la aplicación de método.</p>
<p>Tesis Propuesta de diseño de una Barrena en CAD para selección en perforación de pozos en aguas profundas Fuente. (Vázquez, 2019)</p>	<p>Este trabajo de investigación llega al diseño de una barrena de perforación tipo PDC, tomando en cuenta conceptos generales como la mineralogía, propiedades físicas y mecánicas de las rocas, con la intención de familiarizarse finalmente con la clasificación de las barrenas, así como las partes que las conforman.</p>	<p>Para esta propuesta de diseño se hace uso de la herramienta de CAD llamada Abaqus. Este es un conjunto de programas informáticos de simulación que aplica el método de los elementos finitos para realizar cálculos estructurales estáticos lineales y no lineales, dinámicos como simulación de impactos, problemas de contacto de sólidos, térmicos, mecánica de fluidos, piezoeléctricos entre otros.</p>	<p>Se describen los parámetros de diseño de una barrena PDC, para así llegar a una propuesta, analizando su factibilidad para su producción, tomando en cuenta el análisis de resultados con la simulación del mecanismo de corte de un cortador en un material.</p>
<p>Tesis Estudio y análisis de una perforadora Hidráulica para pozos de agua en la región Puno.</p>	<p>El recurso hídrico en su mayoría de las regiones del Perú, es muy limitado, tal es caso de la región Puno y las cuencas que existen, en donde la población específicamente rural, sufren los estragos</p>	<p>Se ha hecho posible el estudio de un sistema de perforación de una maquina adecuada para los procesos de perforación de suelos, mejorando así el conocimiento que se tenía</p>	<p>Se estudió con la teoría de estática para analizar el diagrama de fuerzas y hallar los esfuerzos concentrados en cada una de sus partes componentes, para lograr nuestros objetivos. El análisis con el software</p>

Fuente. (Suaña, 2016)	del recurso hídrico. Ante este problema, es necesario recalcar que las aguas subterráneas de estas cuencas, cumplen un rol muy importante, sobre todo en la zona rural donde son utilizadas principalmente en los usos doméstico y pecuario en ese orden; de ahí la importancia de la explotación de las aguas subterráneas sobre todo en los años secos, donde estas poblaciones presentan un panorama desolador.	sobre las máquinas de perforación hidráulica. Realizar los cálculos y análisis para esfuerzos de ruptura para rocas de más de 20Mpa, porque existen terrenos muy duros en zonas de alturas mayores a 4200msnm, los cuales están conformadas por rocas de tipo pizarra y caliza.	Inventor 2015, nos ha permitido ver el diseño de una máquina de perforación, adaptable para cualquier terreno, con un transporte adecuado, y una estabilización de su estructura garantizada. Se ha simulado para investigar las características estructurales de esfuerzos, factor de seguridad, criterio de con mises y desplazamiento. Los cuales se realizaron a cada componente, para su análisis más exacto.
Libro Technical review borehole drilling and rehabilitation under field conditions Fuente. (ICRC, 2010)	Esta revisión técnica presenta y sintetiza una cantidad impresionante de experiencia práctica en el campo de la perforación y rehabilitación de pozos.	David Soulsby, autor de esta publicación y un experimentado geólogo / geofísico / ingeniero de aguas, logra el equilibrio adecuado entre el conocimiento teórico y práctico mientras adopta el enfoque de un erudito / practicante. Se realza una solución en aquellas zonas áridas de difícil acceso.	Esta revisión está diseñada como una herramienta de toma de decisiones para ayudar a tomar decisiones rentables entre los métodos de perforación de pozos y decidir si perforar nuevos pozos o rehabilitar sitios existentes. El resultado final debería ser una instalación rentable capaz de suministrar agua potable durante muchos años.

Nota fuente: Autor del proyecto

4.1.1 Generalidades y características de los suelos del Municipio de Ocaña Norte de Santander. Se describe de manera general y con base en lo reportado en la literatura las características principales de los suelos del Municipio de Ocaña. Estas características permiten identificar parámetros de diseño relevantes para el equipo de perforación planteado.

4.1.1.1 Características ambientales de la provincia de Ocaña. Según estudios realizados por parte del departamento de Ingeniería Civil de la Universidad Francisco de Paula Santander, la provincia de Ocaña se encuentra ubicada en la cordillera Oriental (Cordillera de las Andes) la

rodean un sistema montañoso con alturas que alcanzan los 2600 msnm (metros sobre el nivel del mar). Su drenaje es regular, las aguas tienen un drenaje con dirección oriente hacia partes más bajas llegando a zonas de quebradas. Generalmente los suelos subsuperficiales se encuentran secos; en temporadas de lluvias la humedad es evaporada rápidamente. (Muñoz & Ballesteros, 2013)

4.1.1.2 Geología Regional. Según INGEOMINAS el departamento tiene una orogenia que se desarrolla sobre una diversidad de materiales de diferente naturaleza mineralógica, las edades abarcan desde el Precámbrico (era geológica más antigua y precede a la era primaria o paleozoica. Las rocas ígneas están formadas por materiales paleozoicas de tipo intrusivo (plutones y batolitos ácidos como el batolito de Ocaña) y extrusivo (compuestos por riolitas con capaces areniscas). El macizo Norte Santandereano está constituido por rocas ígneas no foliadas, en su mayoría granitos de Durania, granito de Pescadero y cuarzos de la edad jurásica. (Muñoz & Ballesteros, 2013)

Las rocas metamórficas están formadas por migmatitas, gneiss, ortoneis, granítico, mármol, esquistos, filitas y pizarras; las rocas sedimentarias están constituidas por materiales de origen Detrítico y químico (incluyen areniscas, arcillolitas, lunitas, calizas). Dentro del plioceno, se tienen las Formaciones Algodonal y Necesidad, constituidas por conglomerados poco consolidados y cantos de roca metamórfica e ígnea ubicados al nororiente del Departamento en inmediaciones del río Algodonal, las cabeceras municipales de Ocaña, La Playa y Abrego y al noroccidente entre los ríos Catatumbo y Vetás, con capas de gravilla, arena y residuales arcillosas. (Muñoz & Ballesteros, 2013).

En el flanco occidental del valle de Ocaña, hacia el oeste y hacia el sur afloran rocas metamórficas pertenecientes a la formación Bucaramanga y conformadas por neises anfibólicos, neises cuarzo feldespáticos, anfibolitas y cuarcitas. Morfológicamente se manifiestan como las cuchillas alargadas y más altas que conforman la divisoria de aguas entre el valle del río Magdalena y el valle del río algodónal.

La formación Gneis Bucaramanga está afectada por metamorfismo regional y está en contacto fallado y discordante con el Ortoneis. A su vez la unidad se encuentra afectada por magmatismo Jura- Triásico manifestado en abundantes diques de riolita y diques básicos que cortan las rocas metamórficas. Buenos afloramientos de esta unidad fueron observados en las carreteras Ocaña- Río de Oro, Ocaña-pueblo Nuevo, Ocaña Santuario de la Virgen de Torcoroma, Ocaña Buenavista. Macroscópicamente presenta lineación marcada por cuarzo, feldespato y presenta efectos tectónicos producidos por la falla Bucaramanga (Muñoz & Ballesteros, 2013).

4.1.1.3 Geología Local. La provincia de Ocaña está ubicada de acuerdo a la carta Cronoestratigráfica de Colombia (CCC, INGEOMINAS) en terreno Santandereano; existen dos formaciones geológicas que caracterizan a la región, la primera es la Formación Algodonal definida de ambiente continental alivio-fluvial, constituidos por conglomerados, fragmentos de rocas y cuarzo amarillo y gris. La otra Formación se conoce como complejo Intrusivo-Extrusivo haciendo parte a lo que hoy se denomina Macizo Santander; esta presenta rocas sedimentadas poco consolidadas y altamente meteorizadas, estas son susceptibles a los procesos erosivos.(Muñoz & Ballesteros, 2013)

4.2 Comparación de tecnologías de perforación y parámetros de diseño a considerar.

Para tomar una decisión en el diseño a abordar, es necesario saber y comprender el funcionamiento de los diversos mecanismos de perforación. Así mismo, identificar la base-estructura o soporte que se convertirá en la plataforma propuesta. Esta sección da respuesta a la fase II de la sección 3.0. La información se resume en la **Tabla 5**, lo cual permite un enfoque general como se muestra a continuación:

Tabla 5. *Mecanismos de Perforación*

Mecanismo	Ventajas	Limitaciones
a. Percusión	<ul style="list-style-type: none"> • No es necesario detener la operación cada cierto tiempo dando mayor profundidad. • Conexiones simples. • Sistema de rotación compuesto por un solo motor. 	<ul style="list-style-type: none"> • Espacio para el montaje amplio. • Embrague adicional para el motor de pasos. • Golpes iniciales fuera del área a perforar. • Mayor tiempo de perforación
b. Rotación	<ul style="list-style-type: none"> • Mecanismos simples, su sistema mecánico es fácil en su manejo; ya que posee un motor que realiza la rotación. • Poco tiempo de montaje. • Todos los elementos de perforación en la torre son sencillos. • La sarta de perforación permite ser acoplada a la bomba de lodo manualmente. • Este método permite realizar pozos profundos. 	<ul style="list-style-type: none"> • El movimiento giratorio ocasiona fuerzas adicionales sobre el sistema; esto implica que la torre y los apoyos deben ser robustos. • El sistema de transmisión de potencia está sometido al desgaste frecuentemente. Lo que origina un valor extra en su lubricación • Su Complejidad en el montaje es mayor a comparación de otros sistemas de perforación.
c. Perforación Sónica	<ul style="list-style-type: none"> • Más rápido que los métodos convencionales • Amplio poder de perforación. • Eficiencia en un 80% 	<ul style="list-style-type: none"> • Mayor consumo de energía. • Equipos costosos • Difícil manejo en los lugares lejanos y complejo transporte del equipo

-
- d. Perforación con Barrena**
- Diámetros pequeños permitiendo el estudio de suelos.
 - Pequeños montajes, permitiendo así el fácil manejo y transporte.
 - Rápido tiempo de perforación.
 - Poco alcance en la perforación puesto que no cuenta con un sistema complejo de unidad de potencia robusto.
 - El taladro no es práctico en rocas con una mayor dureza.
-
- e. Perforación por inyección directa de fluido**
- Método rápido y simple.
 - Su uso y elaboración es económico.
 - Fácil acceso a la obtención de aguas subterráneas.
 - Pozos poco profundos no consolidados.
 - Inestabilidad del terreno ya que no existe una pared que soporte el pozo internamente.
-
- f. Perforación por muestreo Directo de empuje e impulsión**
- Se es necesario utilizar este método en suelos relativamente blandos.
 - Mayor movilidad del equipo ya que estos están montados sobre una estructura que es de fácil armado.
 - Pozos de diámetros pequeños, ya que se utilizan para estudios Geotérmicos y para investigaciones.
 - Los pozos no superan los 10 metros de profundidad.
-
- g. Perforación para pozos de observación y monitoreo de suelos**
- Perforación rápida del pozo para el monitoreo.
 - La captación del agua es rápida ya que la tubería tiene un orificio permitiendo extraer a la vez que se perfora.
 - Poco Diámetro del pozo (aproximadamente 40 a 75 mm de diámetro)
 - Se utilizan en suelos y/o sedimentos sueltos de arena o dunas.
 - El pozo se utiliza una sola vez.
-

h. Perforación manual

- Es tal vez el método más económico ya que lo más costoso corresponde a la bomba hidráulica que extraiga el agua subterránea.
- No existe estructura compleja.
- Largo tiempo de construcción ya que se realiza con herramientas mecanizadas por el hombre.
- La extracción de agua es de forma directa lo que no permite que ella se examine para el consumo humano.

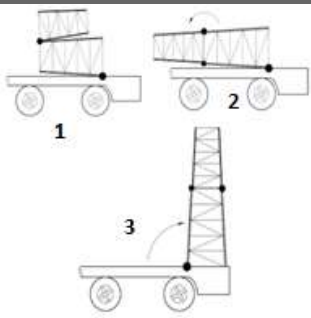
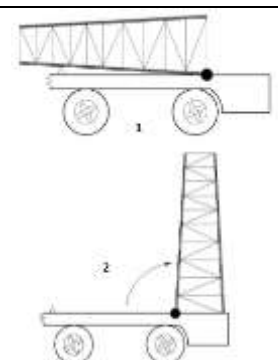
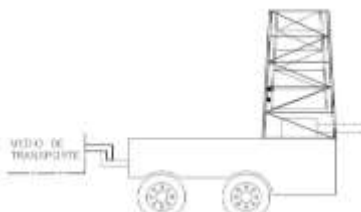
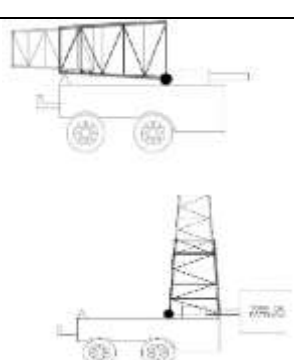
Nota: Autor del Proyecto

Como se observa en la tabla anterior, los distintos mecanismos de perforación toman sus ventajas y limitaciones que hacen que cada uno ofrezca una opción adecuada para una actividad en particular. En este trabajo, se selecciona la tecnología de perforación por rotación, la cual acorde a sus características representa el mecanismo más adecuado para este proyecto. Así mismo, es una tecnología con mayor abordaje, sus características de diseño son claras, su construcción, operación, mantenimiento y costos son accesibles y logrables para los propósitos de este proyecto.

4.2.1 Alternativas para el diseño del bastidor a usar en la plataforma o torre de perforación. Otra alternativa importante en el diseño de la plataforma hidráulica de perforación para pozos de agua es la torre o bastidor, cuyo elemento soporta todas las fuerzas del mecanismo de perforación.

A continuación, se establece un resumen de las características, ventajas y limitaciones de las opciones de diseño para el bastidor. La **Tabla 6**, resume algunas características de las torres usadas en la perforación hidráulica. La información mostrada fue tomada de (Mosquera & Haro, 2018).

Tabla 6. Opciones de diseño del bastidor a usar en la plataforma o torre de perforación

Nombre	Esquema	Característica	Ventajas	Limitaciones
Torre doble Abatible Horizontal		Montada en un vehículo para su transporte, su posición es horizontal y formada en dos partes antes de su armado.	Fácil transporte, plegable para zonas de difícil acceso, diseño simple y fácil.	Inestable a la hora de la perforación, incremento en el número de piezas (cilindros hidráulicos)
Torre simple Abatible Horizontal		La torre esta sobre un vehículo, pero de forma horizontal total; compuesta por una sola parte en su armado.	No existe cilindros hidráulicos, son simples en su diseño en cuantos a los mecanismos de abatimiento.	Es necesario cilindros de abatimiento (costos), plataforma grande (difícil de maniobrar), no es plegable y de fácil manejo.
Torre Telescópica Vertical		Torre que se forma de varios tramos, en donde cada uno es más pequeño que el que lo contiene.	No requiere de un sistema que ponga la torre en vertical, diseño compacto.	Posición vertical ocasionando difícil transporte, inestabilidad a la hora de perforación.
Torre telescópica abatible		Al momento del transporte esta permanece Horizontal, facilitando esta labor. Su armado deja que su parte inferior deslice.	Buena disposición de espacio de la plataforma, su diseño es bastante compacto.	Se necesita de un sistema extra para ponerlo vertical, precauciones en el diseño por partes móviles.

Nota. Autor de Proyecto

Existen diversos trabajos realizados en relación con la finalidad de este proyecto de investigación; permitiendo establecer los parámetros de diseño. En la tabla anterior (**Tabla 6**) se resumen las características de aquellos aspectos que debe tener en cuenta la plataforma de perforación, esta revisión permite concluir algunos puntos a favor y en contra de las usuales plataformas de perforación que existen.

4.3 Diseño conceptual de la plataforma de perforación

Cómo se planificó, este proyecto plasma una idea de diseño que nace con la necesidad de extracción de aguas subterráneas en la región, existen lugares lejanos donde acceder a este recurso es muy difícil.

La *Figura 19* muestra el diseño conceptual de la plataforma de perforación. Se observa que adherido a este modelo se encuentran los diversos sistemas que ayudan a que la extracción del agua, los motores hidráulicos, la bomba de extracción de lodos, la cadena que transmite la tensión y la estructura para soportar el peso general de todo el mecanismo.

En este caso, la finalidad de este estudio es realizar un diseño del marco estructural de la plataforma, obtener la fuerza máxima que puede soportar, así como la deformación que se produce.

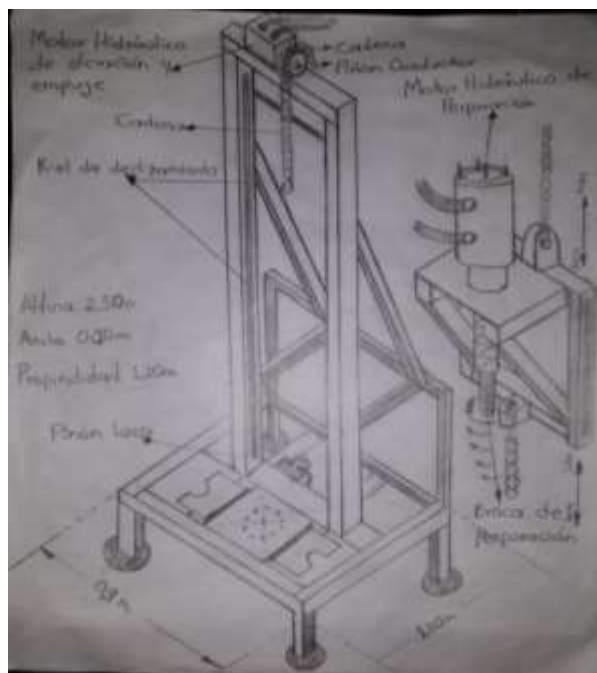


Figura 19. Diseño conceptual de la plataforma de perforación.

Fuente: Autor del proyecto

Como se puede apreciar en la parte superior (*Figura 19*) se encuentra la columna del bastidor que soporta fuerzas de funcionamiento del sistema. Las columnas son el frente de diseño, pues éstas permiten realizar estimaciones iniciales de las dimensiones del sistema. La estructura soporta el motor hidráulico de elevación donde se dispone un piñón conductor de tensión dada por la cadena, en la parte inferior se ubica un piñón conducido denominado “piñón loco” (se le dice así ya que no realiza ningún esfuerzo al recibir la cadena). Una mesa de perforación se desliza por la estructura dando lugar al trabajo, en ella se encuentra un motor hidráulico de perforación y los ganchos de sujeción donde la cadena realiza dos trabajos continuos, el primero, elevar la sarta de perforación y segundo en ayudar a que la broca perforo con facilidad al suelo mediante el accionamiento del motor hidráulico de elevación (parte

superior). En secciones siguientes se presentan cálculos en el diseño de dicha base de perforación para pozos de agua.

4.3 Aspectos a tener en cuenta en el diseño

A continuación, se presentan los parámetros y las variables de operación esenciales en el diseño de sistemas de perforación por rotación. Es importante conocer qué se pretende perforar; la resistencia de la roca; las variables inherentes como la velocidad en la rotación, la fuerza de empuje, el diámetro de la herramienta y la velocidad de penetración de la herramienta.

4.3.1 Resistencia de la roca (S_c) y profundidad en la perforación. Este parámetro permite determinar las características mecánicas de la roca de manera que se pueda conocer la resistencia que ésta opone al ser perforada. Acorde al manual de perforación y voladura de rocas (Llera et al., 2003), no existe una clasificación universal para los distintos tipos de roca, no obstante, podría realizarse la siguiente categorización (**Tabla 7**) (Gimeno, 2006).

Tabla 7. Tipo de roca y sus principales características

Tipo de Roca	Resistencia a la compresión (MPa)	Resistencia a la compresión (psi)	Velocidad de rotación (rpm)
Muy blandas	< 40	<5801	100-120
Blandas	40-80	5801-11603	80-100
Medianas	80-120	11603-17404	60-80
Duras	120-200	17404-29007	40-60
Muy duras	>200	>29007	30-40

Nota: Autor del Proyecto

La resistencia a la tensión en rocas sólo es un 10 a 15% de la resistencia a la compresión de las mismas, por lo que el diseño se basa en la resistencia a la compresión.

La resistencia a la compresión de estos materiales depende principalmente de su composición mineralógica. Materiales como el cuarzo poseen resistencias superiores a los 500 MPa, mientras que, silicatos ferromagnéticos y aluminosilicatos varían de 200 a 500 MPa. Así mismo, minerales como la calcita poseen valores entre 10 y 20 MPa (Gimeno, 2006).

En este caso, la resistencia a la compresión es el parámetro que debe conocerse. Al tomar como referencia un estudio geotécnico de suelos realizado en la región del municipio de Ocaña (**Tabla 8**). En el estudio se realizaron pruebas de penetración estándar que permitieron determinar propiedades del suelo en la región de Ocaña.

Tabla 8. Resultados de laboratorio de suelos del municipio de Ocaña.

Parámetro	Valor
Humedad Natural (%)	Min: 10.19%; Máx.: 27.14%
Gravedad específica (Gs)	Min: 2.57; Máx.: 2.72
Perfil crítico del suelo (ϕ')	33.26°
Perfil bajo del suelo (ϕ')	31.78°
Cohesión efectiva baja del suelo	37.10 kPa
Cohesión media	23.52 kPa
Clasificación del suelo	SC
Peso unitario Húmedo (γ^m)	Min: 19.15 kPa; Máx.:19.60 kPa
Peso Volumétrico aparente-Roca (γ)	24.53 kN/m ³
Resistencia Compresión- Roca (Sc)	45.69 MPa

Fuente.(Amaya et al., 2013)

Para propósitos de diseño, se tomó un valor promedio de la resistencia a la compresión de 60 MPa; este valor es superior al obtenido mediante el estudio de suelos (**Tabla 8**) el cual arrojó 45.69 MPa lo que permite tener un margen de trabajo más adecuado. Con base en el valor de la resistencia a la compresión, se determina que los suelos del municipio de Ocaña se pueden clasificar como rocas blandas acorde a lo reportado en la tabla 7.

$$S_c = 60 \text{ MPa}$$

Por otra parte, para estimar la profundidad en la perforación del diseño propuesto, se tomará como fundamento estudios de investigación realizados en la región del Catatumbo por el IDEAM (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios ambientales). La obtención de aguas subterráneas en esta zona del país de acuerdo a la Red nacional de aguas subterráneas junto con el Ministerio de Ambiente, vivienda y Desarrollo territorial estiman que existen unos 300 pozos con profundidades entre 50 y 120 m (Ambiente & Territorial, 2009)

Acorde a los valores reportados anteriormente, en este estudio se toma un valor promedio de 85 m como referencia para el diseño de la perforadora.

4.3.2 Velocidad de rotación. La velocidad de rotación depende del tipo de roca a perforar como se muestra en la *Figura 20*. Este es un parámetro que debe definirse, dado que afecta la velocidad de penetración, es decir, a mayor velocidad de rotación, mayor penetración se produce. La figura 20 muestra la relación entre ambas velocidades.

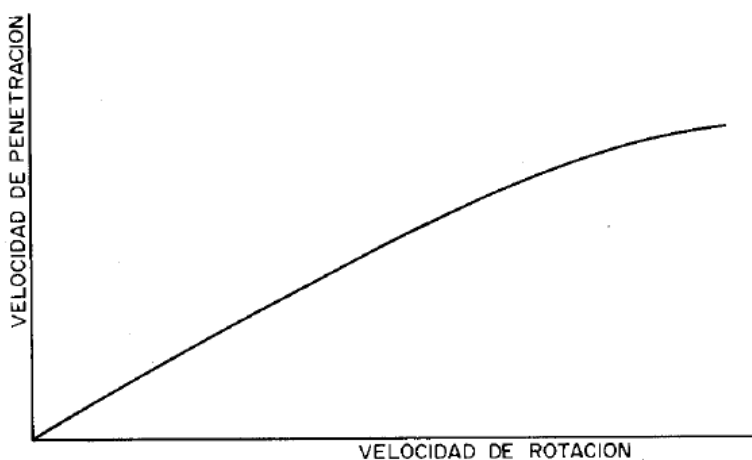


Figura 20. Relación velocidad de penetración vs velocidad de rotación.

Fuente: (Llera et al., 2003)

Se debe seleccionar un valor de la velocidad de rotación acorde a la resistencia a la compresión de la roca; por consiguiente, la resistencia tomada fue de 60 MPa; Con base en este valor, se tomó una velocidad de rotación de 100 rpm para una roca tipo blanda.

4.3.3 Fuerza de empuje. Esta variable hace referencia a la fuerza que es necesario aplicar para que la herramienta de perforación logre superar el esfuerzo de compresión asociado a la roca. El valor calculado no debe ser excesivo, puesto que podría acortar la vida útil de la herramienta de perforación.

La *Figura 21* muestra el comportamiento de la velocidad de penetración en función de la velocidad de empuje. Tres zonas de operación son descritas: a) empuje insuficiente; b) empuje eficiente; c) pérdida de eficiencia.

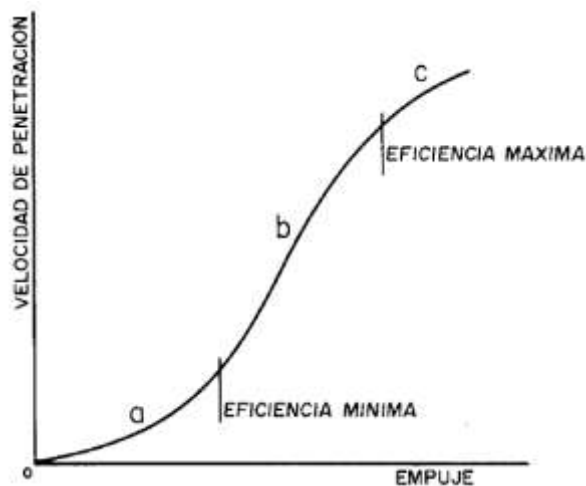


Figura 21. Zonas de operación de la máquina.

Fuente: (Llera et al., 2003)

Acorde al manual de perforación y voladura de rocas (Llera et al., 2003), las siguientes ecuaciones son necesarias para el cálculo de la fuerza de empuje.

$$F_{\min} = 28.5 * S_c * \Phi \quad \text{Ecu. 1}$$

$$F_{\max} = 2 * F_{\min} \quad \text{Ecu. 2}$$

$$F_{\text{Lím}} = 810 * \Phi^2 \quad \text{Ecu. 3}$$

Donde:

F_{\min} es la fuerza de empuje mínima (lbf) para vencer la resistencia a la compresión de la roca.

F_{\max} es la fuerza de empuje máxima (lbf) que podría ser aplicada sobre la roca a suelo a perforar.

S_c representa la resistencia a la compresión (MPa), la cual depende del tipo la roca,

Φ es el diámetro del barrenado o tricono (Pulg).

Acorde a la **Tabla 9**, es posible aplicar la ecuación 1, sobre los valores de la resistencia a compresión para cada tipo de roca. En este caso, la ecuación se modifica para que quede en función del diámetro, esto es: $\frac{F_{\min}}{\Phi} = 28.5 * S_c$, lo que produce la siguiente tabla:

Tabla 9. Tipo de roca y sus principales características

Tipo de Roca	Resistencia a la compresión (MPa)	$\frac{F_{\min}}{\Phi}$ (lb/pulg)
Muy blandas	< 40	<1140
Blandas	40-80	1140-2280
Medianas	80-120	2280-3420
Duras	120-200	3420-5700
Muy duras	>200	>5700

Fuente. (Llera et al., 2003)

Según la guía básica de perforación para pozos profundos en Colombia los diámetros (Φ) a establecer en las brocas de perforación comercial óptimos en el mercado corresponden a $3\frac{1}{2}$, $5\frac{1}{2}$ y

6 pulgadas. Estos diámetros son utilizados con el fin de crear una formaleta (se le llama a elementos que funcionan como moldes, temporales o permanentes, en los que se vierte el concreto, y los cuales pueden ser de diversos materiales) que sirva de camisa al pozo perforado permitiendo utilizar una tubería de 2" o 4" (Lizarazo, 2015).

Para este caso, se utilizará un diámetro promedio de 4 pulgadas (101.6 mm) para permitir una posible pared del pozo. Este parámetro es un valor de entrada libre que se le da al proyecto para su análisis.

Con base en esto, la fuerza mínima corresponde a:

$$F_{\text{mín}} = 28.5 * 60\text{MPa} * 4 \text{ pulg}$$

$$F_{\text{mín}} = \mathbf{6840 \text{ lb}}$$

(Factor de conversión; 1lb = 4.44822 N)

$$F_{\text{mín}} = 30425.84 \text{ N}$$

$$F_{\text{mín}} = \mathbf{30.425 \text{ kN}}$$

La fuerza máxima sería;

$$F_{\text{máx}} = 2 * 30.425 \text{ kN}$$

$$F_{\text{máx}} = \mathbf{60.85 \text{ kN}}$$

Para fines de cálculo, se tomó un valor de 35 kN como fuerza de empuje, la cual representa el 57% de la fuerza máxima.

$$F_E = \mathbf{35 \text{ kN} = 35000 \text{ N}}$$

$$F_E = 3569.0067 \text{ kgf}$$

4.3.4 Velocidad de penetración. Este parámetro representa la velocidad de avance lineal de la herramienta de perforación. Varias fórmulas han sido propuestas para la estimación de esta velocidad. En general cada una de las fórmulas propuestas considera aspectos como: diámetro de perforación, fuerza de empuje, velocidad de rotación, y resistencia a la compresión de la roca. En este proyecto, se usó la fórmula de R. Praillet (Ecuación 4), propuesta por varios autores (Llera et al., 2003) (Pezo, 2019) (Jiménez & Mestra, 2017).

$$V_p = \frac{63.9 * F_E * n}{S_c^2 * \Phi^{0.9}} \quad \text{Ecu. 4}$$

Donde:

V_p representa la velocidad de penetración (m/h) de la herramienta de perforación.

F_E es la fuerza de empuje (kgf, kilogramos fuerza), la cual se estima a partir de las ecuaciones 1 y 2, con su respectiva conversión de unidades.

n es la velocidad de rotación (rpm, revoluciones por minuto) de la herramienta de perforación.

S_c indica la resistencia a la compresión de la roca (MPa).

Φ es el diámetro del tricono (mm).

Por consiguiente, la velocidad de penetración sería:

$$V_p = \frac{63.9 * (3569) * (100 \text{ rpm})}{(60 \text{ Mpa})^2 * (101.6 \text{ mm})^{0.9}}$$

$$V_p = 98.98 \frac{\text{m}}{\text{h}}$$

$$V_p = 1.65 \frac{\text{m}}{\text{min}}$$

4.3.5 Torque y potencia asociada a la perforación. El diseño de la perforada debe incluir la potencia necesaria para la rotación de la herramienta de perforación, así como la potencia necesaria para la evacuación de la sarta respectivamente (Llera et al., 2003).

El cálculo de la potencia (Ecuación 5) se estima a partir del torque necesario para hacer girar el tricono, multiplicado por la velocidad de rotación de la herramienta de perforación.

$$P = \frac{T * n}{63025} \quad \text{Ecu. 5}$$

donde T corresponde al torque (lb. pulg) necesario para girar el tricono, n es la velocidad de rotación (rpm), y P es la potencia (HP). (Llera et al., 2003) propuso la siguiente ecuación para la estimación de la potencia cuando no se conoce el torque.

$$P = 8.55 \cdot 10^{-9} \times \Phi^2 \times n \times F_E^2 \quad \text{Ecu. 6}$$

donde Φ es el diámetro en mm, y F_E es la fuerza de empuje en kN.

Al aplicar la ecuación 6 se tiene:

$$P = 8.55 \cdot 10^{-9} \times 101.6^2 \times 100 \times 35^2$$

$$\mathbf{P = 10.81 HP \approx 11.0 HP}$$

Una vez calculado la fuerza tangencial, el torque puede estimarse mediante la ecuación 5:

$$T = \frac{11 \times 63025}{100}$$

$$T = 6932.75 \text{ lbf. pulg}$$

$$\mathbf{T = 783.3 N.m}$$

4.4 Cargas externas sobre la plataforma de perforación

El sistema propuesto está expuesto a diferentes situaciones de trabajo. La primera corresponde al momento en que la estructura soporta el peso del sistema rotor de perforación en descenso. La segunda situación se da cuando todo el conjunto se encuentra tensionado mediante el accionamiento de la sarta de perforación (ascendiendo) y el cabezal, broca y tubería suspendidos. En la **Tabla 10** se muestran las características principales de estas dos situaciones.

Tabla 10. Situaciones de la plataforma

Situac.	Características	Análisis y Observaciones	
1	Cuando el mecanismo baja	$F_{\text{trabajo}} = F_{\text{max}}$ $F_{\text{trabajo}} = 35 \text{ kN}$	Se tomará para cálculos este valor como fuerza de trabajo
2	Cuando todo el conjunto asciende (después de hacer el trabajo de perforación)	<ul style="list-style-type: none"> • $W_T = W_{\text{nominal}} * H_{\text{max}} * g$ • $W_B = V_{\text{Barreno}} * L_B * \rho_{\text{Acero}} * g$ • $W_{Bt} = \rho_{\text{terreno}} * V_{\text{terreno}} * L_B * g$ • $W_{LT} = \rho_{\text{Lodo}} * H_{\text{max}} * A_{\text{anular}} * g$ • $W_{LT_{int}} = \rho_{\text{Lodo}} * H_{\text{max}} * A_{\text{int}} * g$ $F_{\text{total}} = \sum W_{\text{factores}}$	Se presentan factores que impiden el funcionamiento (fuerza de tensión); F_t

Nota: Autor del Proyecto

Donde;

W_T , se denomina peso en la tubería de perforación; W_{nominal} , sería el peso nominal de la tubería por unidad de longitud que en nuestro caso sería de $5.55 \frac{\text{kg}}{\text{m}}$; H_{max} , es la Longitud o cabeza máxima de perforación que en nuestro caso sería de 85 m; g , se asocia la velocidad de gravedad de 9.81 m/s^2 ; W_B , se denomina peso del Barreno; V_{Barreno} , sería el volumen que ocupa el Barreno en la perforación; L_B , es la longitud del Barreno establecido en 2500mm; ρ_{Acero} se denomina la densidad del acero igual a $7850 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$; W_{Bt} , lo denominamos

peso del terreno adherido al Barreno; ρ_{terreno} , es la densidad del terreno $2500 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$; V_{terreno} , sería el volumen ocupado de terreno; W_{LT} , se denomina peso del lodo en la tubería de perforación; ρ_{Lodo} , es la densidad del lodo a convenir de $1080 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$; A_{anular} , es el área de la tubería en m^2 ; $W_{LT_{\text{int}}}$, sería el peso del lodo en la tubería de perforación (sección interna); A_{int} , es el área interna de la tubería en m^2 ; por último se denomina como F_{total} , a la sumatoria de los factores que intervienen en la cabeza de perforación ($W_{LT_{\text{int}}}$, W_{LT} , W_{Bt} , W_B y W_T) expresada en kN.

A continuación, La *Figura 22* ilustra las dos posiciones en cuestión en que realiza el trabajo de perforación la sarta del sistema; obsérvese el punto neutro de perforación dentro del pozo y el mecanismo en su estado máximo (tensionado).

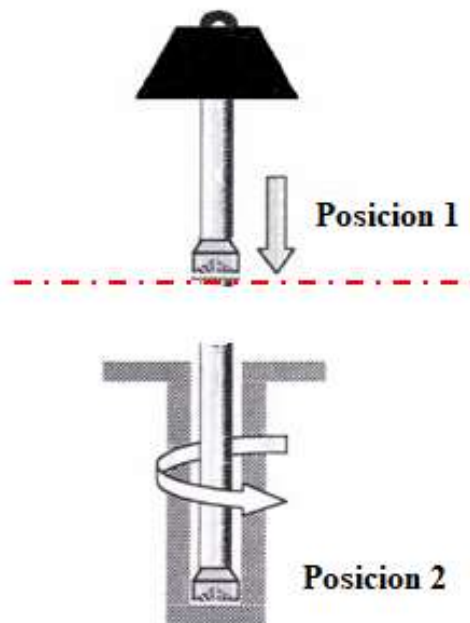


Figura 22. Posiciones de trabajo de la sarta de perforación.

Fuente: (Víctor, 2019)

4.4.1 Posición 1 (Cuando la cabeza de perforación desciende). Para este caso se tomará la fuerza de trabajo como la fuerza máxima que ejerce la cabeza de perforación a la estructura del sistema de la plataforma como se puede observar en la Figura 30, situación 1, esto sería:

$$F_{\text{trabajo}} = F_{\text{max}}$$

$$F_{\text{trabajo}} = 35 \text{ kN}$$

Se aplica en este caso una fuerza que comprime verticalmente el punto de apoyo del cabezal que hace el trabajo de giro al perforar. Se debe tener en cuenta que existen factores ajenos interviniendo en esta fuerza vertical de trabajo como lo son: el viento; las condiciones particulares del estado del suelo, la temperatura del ambiente en que se perfora, el cambio de velocidad y tiempo de trabajo, entre otros, por lo que se modifica la Fuerza de trabajo incrementándola una tercera parte, lo que permite dar un margen de seguridad al diseño.

$$F_{\text{trabajo}} = \frac{4}{3} (35) \text{ kN}$$

$$F_{\text{trabajo}} = 46.7 \text{ kN}$$

4.4.2 Posición 2 (El mecanismo este tensionado después de haber realizado la perforación). Como se aprecia en la *Figura 22*, en esta situación de trabajo de la plataforma de perforación, todo el sistema se encuentra suspendido (ascendiendo) presentado una fuerza de tensión provocada por la tubería y la suspensión de la broca o barreno originada por la extracción del equipo cabezal del pozo. Para ello se deben calcular los pesos que ejercen tensión sobre el cabezal de perforación: Peso de la Tubería, Peso del Barreno, Peso del Barreno + peso del terreno, Peso del lodo en la Tubería.

4.4.2.1 *Peso de la tubería.* Para establecer la tubería que utilizará la plataforma de perforación, se deben especificar las características de la misma según criterio del diseñador y siguiendo recomendaciones de diseño para este tipo de elementos. El peso máximo de la tubería se presentará cuando la profundidad alcanzada por la misma sea de 85 metros (definida anteriormente).

Para propósitos de diseño se toma una tubería de perforación con Rosca AW (común en Colombia) con las siguientes características:

$$D_{\text{ExtT}} = 2\frac{1}{4} = 57.1 \text{ mm}; \text{ diámetro exterior de la tubería de perforación.}$$

$$D_{\text{IntT}} = \left(\frac{29}{32}\right)'' = 48.1 \text{ mm}; \text{ diámetro interior de la tubería de perforación.}$$

$$W_{\text{nominal}} = 5.55 \frac{\text{kg}}{\text{m}}; \text{ Peso por unidad de longitud de la tubería de perforación.}$$

Para una longitud de 85 metros, la fuerza asociada al peso de la tubería (W_T) es:

$$W_T = 5.55 \frac{\text{kg}}{\text{m}} \times 85 \text{ m} \times 9.81 \text{ m/s}^2$$

$$\mathbf{W_T = 4.63kN}$$

4.4.2.2 *Peso del Barreno.* Para determinar el peso que le proporciona la Barrena de perforación al sistema, se determinan los siguientes factores:

$$\rho_{\text{Acero}} = 7850 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}; \text{ densidad del acero.}$$

$$D_{\text{ExtB}} = 4'' = 101.6 \text{ mm}; \text{ diámetro exterior del barreno.}$$

$$D_{\text{IntB}} = \left(\frac{29}{32}\right)'' = 48.1 \text{ mm}; \text{ diámetro interior del barreno.}$$

$$L_B = 200 \text{ mm}; \text{ Longitud del barreno}$$

La fuerza asociada al peso del barreno (W_B) es (considerando una sección anular):

$$W_B = \frac{\pi}{4} (0.1016^2 - 0.0481^2) m^2 \times 0.2 m \times 7850 \frac{kg}{m^3} \times 9.81 \frac{m}{s^2}$$

$$\mathbf{W_B = 96.88 N \approx 0.097 kN}$$

4.4.2.3 *Peso del terreno adherido al barreno.* Cuando el trabajo de perforación es realizado el barreno sale del subsuelo no solo con su peso, sino que se atribuye un extra que es en este caso, para generalizar el cálculo se apropia terreno como suelo arenoso.

Diversos autores (Málaga, 2013) (Jiménez & Mestra, 2017) han tomado una densidad promedio para el terreno que se adhiere al barreno. Esta densidad permite estimar la fuerza asociada al peso del terreno que se adhiere al barreno (W_{Bt}).

$$\rho_{\text{terreno}} = 2500 \frac{kg}{m^3}; \text{ Densidad del terreno}$$

$$W_{Bt} = 2500 \frac{kg}{m^3} \times \frac{\pi}{4} (0.1016^2) m^2 \times 0.2 m \times 9.81 \frac{m}{s^2}$$

$$\mathbf{W_{Bt} = 0.04 kN}$$

4.4.2.4 *Peso del lodo en la tubería de perforación (sección anular).* Como en el caso del barreno, sobre la tubería de perforación se adhiere el lodo. Para calcular la fuerza que éste produce es necesario usar la densidad del mismo. Se estima que la densidad del lodo se encuentra en el rango de 1041 a 1080 $\frac{kg}{m^3}$ (Fernández, 2017)(Málaga, 2013). Para propósitos de diseño se seleccionó la densidad de 1080 $\frac{kg}{m^3}$.

$$W_{LT} = \rho_{\text{Lodo}} \times L_T \times A_{\text{anular}} \times g$$

$$A_{\text{anular}} = \frac{\pi}{4} (D_{\text{ExtB}}^2 - D_{\text{IntB}}^2)$$

Donde W_{LT} corresponde a la fuerza del lodo adherido en la tubería en la sección anular, A_{anular} es el área por donde circula lodo en la tubería en m^2 , D_{ExtB} es el diámetro externo del barreno y D_{IntB} el diámetro interno respectivamente (m).

$$W_{LT} = 1080 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \times 85 \text{ m} \times \frac{\pi}{4} (0.1016^2 - 0.0481^2) \text{m}^2 \times 9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

$$W_{LT} = 5.66 \text{ kN}$$

4.4.2.5 Peso del lodo en la tubería de perforación (sección interna). Para la sección interna de la tubería de perforación, el procedimiento es similar al anterior.

$$W_{LT_{\text{int}}} = \rho_{\text{Lodo}} \times H_{\text{max}} \times A_{\text{interna}} \times g$$

$$W_{LT} = 1080 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \times 85 \text{ m} \times \frac{\pi}{4} (0.0481^2) \text{m}^2 \times 9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

$$W_{LT_{\text{int}}} = 1.64 \text{ kN}$$

Donde $W_{LT_{\text{int}}}$ corresponde a la fuerza del lodo adherido en la parte interna de la tubería.

Con base en los cálculos anteriores, la fuerza máxima que debe soportar el cabezal de rotación de la perforadora corresponde a:

$$F_{\text{total}} = W_T + W_B + W_{Bt} + W_{LT} + W_{LT_{\text{int}}}$$

$$F_{\text{total}} = 4.63 + 0.097 + 0.04 + 5.66 + 1.64$$

$$F_{\text{total}} = 12.067 \text{ kN}$$

Al aumentar este valor un 15% (incluyendo el peso de los elementos desconocidos):

$$F_{\text{total}} = 13.88 \text{ kN}$$

4.5 Bomba de succión de lodo

Se sabe que para transportar fluidos como agua, lodos, espumas etc., se puede realizar mediante bombas de desplazamiento positivo o bombas centrífugas. Esta bomba no es más que un dispositivo que recircula el fluido de perforación (mezcla de arcilla y agua), refrigera la herramienta de corte, sirve de soporte en las paredes y mantiene limpio el sitio más bajo del pozo perforado. En la *Figura 23* se observa una bomba de desplazamiento positivo con engranes rotativos; este desengrane entre los dos elementos internos crea un vacío en la entrada de la bomba, quedando atrapado el fluido entre los dientes y la pared de la carcasa; más luego se gira hacia la salida y se descarga.

Existen una malla de engrane lo que no deja que el fluido se regresa y se descarga por la salida. Para realizar la selección de la bomba debe conocerse la velocidad y el caudal de dicho fluido.

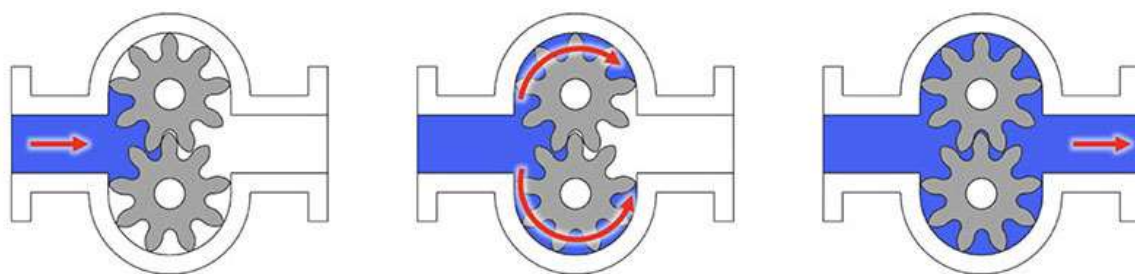


Figura 23. Bomba de desplazamiento positivo de engrane interno

Fuente: (diener precision pumps, 2021)

4.5.1 Velocidad y Caudal del fluido (material participado). Velocidad del fluido.

Para estimar la velocidad del fluido a extraer en el momento de la perforación se toma un valor estimado de acuerdo a la **Tabla 11** del manual de perforación y voladura (Bernaola, 2014);

donde se muestra las características de material a extraer en relación a la velocidad de circulación por una sección.

Tabla 11. *Velocidades de fluido a extraer en la perforación*

Fluido barrido/extraído	Velocidad de circulación $\left(\frac{\text{m}}{\text{min}}\right)$
Aire	900-1800
Agua	45-60
Lodo	30-45
Espuma	10-20

Nota: (Bernaola, 2014)

Para este caso se tomará un valor de velocidad de intermedio de $45 \frac{\text{m}}{\text{min}}$ puesto que se recomiendan tomar estos valores globales en el sector de la perforación de pozos de agua. En este estudio se denominará velocidad que circula, V_{circula} .

Caudal del fluido. Para estimar un valor apropiado en el caudal circundante extraído en la tubería de perforación se utiliza la ecuación 7, permitiendo hallar un valor teórico del caudal.

$$Q = A_{\text{anular}} * V_{\text{circula}} \quad \text{Ecu. 7}$$

Donde;

Q es el caudal que lleva el fluido $\left(\frac{\text{l}}{\text{min}}\right)$, A_{anular} corresponde al área anular por donde circula el fluido; en este caso se tendrá en cuenta los diámetros del Barreno.

$$Q = \left[\frac{\pi}{4} (D_{\text{ExtB}}^2 - D_{\text{IntB}}^2) \right] * V_{\text{circula}}$$

Por tanto;

$$Q = \left[\frac{\pi}{4} (0.1016^2 - 0.0481^2) \right] * 45$$

$$Q = 0.283 \frac{\text{m}^3}{\text{min}}$$

$$Q = 283 \frac{\text{l}}{\text{min}}$$

De esta manera, se puede deducir que, para perforar un diámetro de pozo de 4 pulgadas, se debe seleccionar una bomba de lodos que recircule un caudal de $283 \frac{\text{l}}{\text{min}}$ como valor mínimo en el cálculo teórico del diseño propuesto, el cual es equivalente a $16.98 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$

Se tomará el catálogo “directindustry”, Bomba para fangos ECH series; con las siguientes características: Bomba centrífuga para fango y arena, perfecta para perforación de pozos de agua como lo indica el fabricante. Un Caudal mínimo de $12 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$ hasta un máximo de $3200 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$, presiones de 1 hasta 10 bar, apta para soportar una cabeza mínima de 48 m y máxima de hasta 95 m; estando acorde con la profundidad de este estudio (85m), con diámetros de succión y descarga de 3". Esta bomba de lodos soporta una potencia de 28 Hp hasta 380 Hp según características (Direct industry, 2021).

La *Figura 24* muestra la bomba seleccionada para la extracción de material particulado.



Figura 24. Bomba para fangos ECH series

Fuente: (Direct industry, 2021)

4.6 Motor encargado de la rotación en el sistema de perforación

Para la selección del motor de rotación es necesario tener valores de aquellos parámetros relacionados a este como la velocidad de penetración, el torque y potencia.

Tomando los valores calculados y analizados previamente, de un catálogo comercial se selecciona el motor hidráulico requerido.

La *Figura 25* muestra un motor comercial de la industria hidráulica de Colombia.



Figura 25. Motor hidráulico de engranaje CE series

Fuente: (directindustry, 2021b)

El motor seleccionado para la rotación del sistema de perforación tiene una tecnología de engranaje, baja velocidad y alto par. Una velocidad que arranca de 0 hasta 370 RPM, un par mínimo de 0 hasta un máximo de 1082 Nm, la potencia de rotación de 11 Hp, estando dentro del parámetro establecido de diseño.

4.7 Selección del motor de empuje y diseño del sistema de elevación

Para la selección del motor se tomará una fuerza de empuje de 46.7 kN tal como se calculó anteriormente. Este valor se manifiesta como la fuerza necesaria que puede ejercer el sistema ante la perforación de la roca. El motor hidráulico del sistema de empuje y elevación suministra la velocidad de penetración, esto es $1.65 \frac{\text{m}}{\text{min}}$; la fuerza se transmite al motor mediante un mecanismo de piñón cadena, por lo que se debe calcular el torque necesario del motor en la

elevación y empuje acoplado a un piñón de diámetro exterior característico que en este caso corresponde a 120mm.

La ecuación 8 permite el cálculo del torque del sistema de elevación donde se utilizará la fuerza de empuje y el radio del piñón.

$$T = F_{\max} * r_{\text{ext piñón}} \quad \text{Ecu. 8}$$

Donde;

$r_{\text{ext piñón}}$ corresponde al radio exterior del piñón en mm, F_{\max} es la fuerza máxima de empuje (N).

Esto sería;

$$T = 46700 \text{ N} * 0.06\text{m}$$

$$\mathbf{T = 2802 \text{ N.m}}$$

Ahora se calcula la velocidad de rotación de este motor hidráulico mediante la ecuación 9.

$$W = \frac{V_p}{r_{\text{ext Barreno}}} \quad \text{Ecu. 9}$$

Donde;

$r_{\text{ext Barreno}}$ es el radio externo del Barreno (50.8 mm), V_p representa la velocidad de penetración (m/min) de la herramienta de perforación.

$$W = \frac{1.65 \frac{\text{m}}{\text{min}}}{(0.0508\text{m})}$$

$$W = 27.5 \frac{\text{rad}}{\text{min}}$$

Para obtener la velocidad de giro de este motor hidráulico se aplica el factor de conversión,

$$W = 27.5 \left(\frac{\text{rad}}{\text{min}} \right) \left(\frac{1 \text{ rev}}{2\pi \text{ rad}} \right)$$

$$\mathbf{W = 4.37 \text{ RPM}}$$

de la Ecuación 5 se tiene que la potencia suministrada sería:

$$P = \frac{24799.8 * 4.37}{63025}$$

$$\mathbf{P = 1.78 \text{ HP} \approx 2.0 \text{ HP}}$$

Se tomará el catálogo de Motores hidráulicos Liebherr SAS. Un Motor hidráulico de pistón axial DMFA de alta presión, baja velocidad y un excelente Torque comprendido entre 2151 y 4500 Nm respectivamente como la específica el fabricante. Estos motores son esenciales para la perforación subterránea de extracción de aguas.

Manejan presiones de 0 – 380 bar, con una máxima de 400 bar, su velocidad de rotación se adapta al caso de estudio (4.37 RPM) ya que parte de 0 hasta 2400 RPM y una potencia seleccionada de 2 Hp. (directindustry, 2021a).

La *Figura 26* muestra la representación del motor hidráulico bajo consideración.



Figura 26. Motor hidráulico de pistón axial DMFA de alta presión

Fuente: (directindustry, 2021a)

4.7.1 Cálculo y selección de la cadena. La selección de la cadena no es influyente al deslizamiento ni al arrastre, vida larga y la capacidad para impulsar varios ejes a partir de una sola fuente de potencia. La ANSI (the american National Standards Institute) estandarizó las cadenas de rodillos con respecto a sus tamaños (Budynas & Nisbett, 2012).

La cadena es un componente del sistema que transmite la potencia mediante fuerzas de tracción; sus dos más importantes usos es en sistemas de transporte y transmisión de potencia.

La *Figura 27* muestra la respectiva nomenclatura asignada por la AISI, junto con las partes más relevantes de una cadena de rodillos.

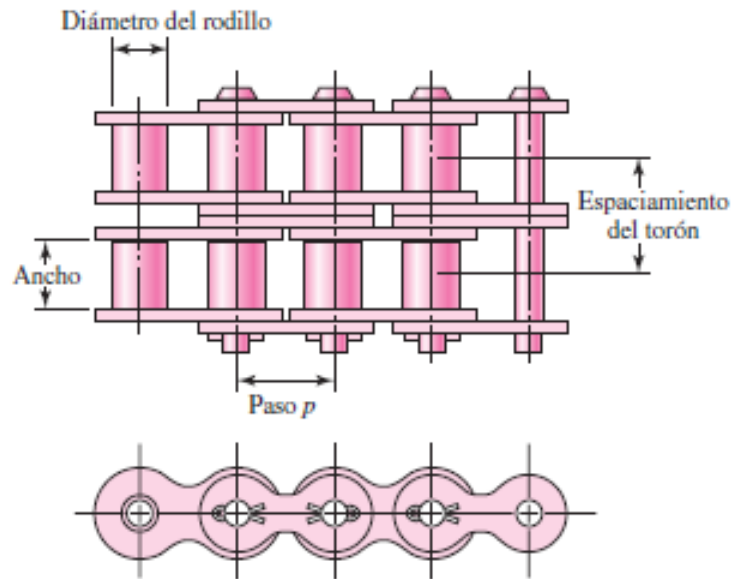


Figura 27. Partes de Cadena de rodillos

Fuente: (Budynas & Nisbett, 2012)

Como primera medida se tiene que la potencia que se transmite a la cadena es de **2.0 HP** calculado previamente mediante la ecuación 5.

Para la selección de la cadena que debe soportar un torque de 2802 N. m equivalentes a 24799.8 .lbf. in y rotar a 4.37 RPM. Se toma la clasificación según la ANSI del Diseño de elementos mecánicos incluidos en el libro Shingley (octava edición). Se selecciona una cadena de rodillos número 120 estándar con tolón sencillo, un paso de 38.1 mm, ancho de 25.40 mm, con resistencia mínima de 28000 lbf, Diámetro de rodillo de 22.22 mm; en la *Figura 28* se muestran estos valores.

Número de cadena ANSI	Paso, pulg (mm)	Ancho, pulg (mm)	Resistencia mínima a la tensión, lbf (N)	Peso promedio, lbf/pie (N/m)	Diámetro del rodillo, pulg (mm)	Espaciamento de torones múltiples, pulg (mm)
25	0.250 (6.35)	0.125 (3.18)	780 (3 470)	0.09 (1.31)	0.130 (3.30)	0.252 (6.40)
35	0.375 (9.52)	0.188 (4.76)	1 760 (7 830)	0.21 (3.06)	0.200 (5.08)	0.399 (10.13)
41	0.500 (12.70)	0.25 (6.35)	1 500 (6 670)	0.25 (3.65)	0.306 (7.77)	— —
40	0.500 (12.70)	0.312 (7.94)	3 130 (13 920)	0.42 (6.13)	0.312 (7.92)	0.566 (14.38)
50	0.625 (15.88)	0.375 (9.52)	4 880 (21 700)	0.69 (10.1)	0.400 (10.16)	0.713 (18.11)
60	0.750 (19.05)	0.500 (12.7)	7 030 (31 300)	1.00 (14.6)	0.469 (11.91)	0.897 (22.78)
80	1.000 (25.40)	0.625 (15.88)	12 500 (55 600)	1.71 (25.0)	0.625 (15.87)	1.153 (29.29)
100	1.250 (31.75)	0.750 (19.05)	19 500 (86 700)	2.58 (37.7)	0.750 (19.05)	1.409 (35.76)
120	1.500 (38.10)	1.000 (25.40)	28 000 (124 500)	3.87 (56.5)	0.875 (22.22)	1.789 (45.44)
140	1.750 (44.45)	1.000 (25.40)	38 000 (169 000)	4.95 (72.2)	1.000 (25.40)	1.924 (48.87)
160	2.000 (50.80)	1.250 (31.75)	50 000 (222 000)	6.61 (96.5)	1.125 (28.57)	2.305 (58.55)
180	2.250 (57.15)	1.406 (35.71)	63 000 (280 000)	9.06 (132.2)	1.406 (35.71)	2.592 (65.84)
200	2.500 (63.50)	1.500 (38.10)	78 000 (347 000)	10.96 (159.9)	1.562 (39.67)	2.817 (71.55)
240	3.00 (76.70)	1.875 (47.63)	112 000 (498 000)	16.4 (239)	1.875 (47.62)	3.458 (87.83)

Figura 28. Dimensiones de cadena Estándares de rodillos tipo americanas

Fuente:(Budynas & Nisbett, 2012)

A demás de especificar la cadena se debe seleccionar los dos piñones; el piñón conductor y el piñón conducido.

El piñón conductor es el encargado de transmitir mediante la cadena la fuerza del motor hidráulico superior a la base de perforación (sube y baja). El piñón conducido realiza el trabajo libre de alguna fuerza, ya que es denominado en este caso “piñón loco”. Esta gira en un sentido u otro dependiendo del momento justo de perforación (empuje o elevación).

Selección del piñón conductor. El número de dientes de este piñón con 4.37 RPM pertenecientes al giro del motor debe ser de 25 dientes ya que se toma una velocidad mayor de 4.49 RPM; con un paso de 38.1 mm pertenecientes al mismo de la cadena antes mencionado; se observa la información según catálogo INTERMEC (ITERMEC, 2021), en la *Figura 29* están estos valores:

HORSEPOWER RATINGS SINGLE STRAND ROLLER CHAIN																									
No. of Teeth Small Sprocket	REVOLUTIONS PER MINUTE-SMALL SPROCKET (rpm)																								
	10	25	50	100	150	200	300	400	500	600	700	800	900	1000	1100	1200	1300	1400	1500	1600	1700	1800	1900	2000	2100
11	1.85	4.22	7.87	14.8	21.2	27.4	39.4	51.1	62.5	58.3	46.4	38.0	31.8	27.1	23.5	20.7	18.4	16.4	14.8	13.4	12.24	11.2	10.4	9.59	0
12	2.04	4.64	8.65	16.1	23.2	30.2	43.3	56.2	68.7	66.5	52.8	43.2	36.2	31.0	26.8	23.5	20.9	18.6	16.9	15.3	13.9	12.8	11.8	10.9	0
13	2.21	5.06	9.43	17.6	25.3	32.9	47.3	61.3	75.0	75.0	59.5	48.7	40.9	34.9	30.2	26.6	23.5	21.1	19.0	17.2	15.7	14.5	13.3	0	0
14	2.40	5.47	10.2	19.0	27.5	35.5	51.2	66.4	81.1	83.8	66.5	54.4	45.6	39.0	33.8	29.6	26.3	23.5	21.2	19.3	17.6	16.1	14.9	0	0
15	2.59	5.90	11.0	20.5	29.6	38.4	55.2	71.5	87.4	92.9	73.8	60.3	50.8	43.2	37.4	32.9	29.1	26.1	23.5	21.3	19.4	17.8	16.5	0	0
16	2.78	6.33	11.8	22.0	31.8	41.0	59.1	76.7	93.7	102	81.3	66.5	55.8	47.6	41.3	36.2	32.2	28.7	25.9	23.5	21.5	19.7	0	0	0
17	2.96	6.75	12.6	23.5	33.9	43.9	63.2	81.8	100	112	89.0	72.8	61.0	52.2	45.2	39.7	35.1	31.5	28.4	25.7	23.5	21.6	0	0	0
18	3.15	7.17	13.4	24.9	36.1	46.7	67.2	87.0	106	122	97.0	79.4	66.5	56.9	49.2	43.2	38.4	34.3	31.0	28.0	25.6	23.5	0	0	0
19	3.34	7.62	14.2	26.6	38.2	49.5	71.2	92.3	113	132	105	86.1	72.1	61.6	53.4	46.8	41.6	37.1	33.5	30.4	27.8	25.5	0	0	0
20	3.53	8.05	15.0	28.0	40.4	52.3	75.4	97.6	119	141	114	92.9	77.9	66.5	57.7	50.6	44.9	40.2	36.2	32.9	30.0	20.4	0	0	0
21	3.71	8.48	15.8	29.5	42.5	55.1	79.4	103	126	148	122	100	83.8	71.6	62.1	54.4	48.3	43.2	39.0	35.4	32.3	0	0	0	0
22	3.92	8.92	16.6	31.1	44.8	57.9	83.5	108	132	156	131	107	89.8	76.7	66.5	58.3	51.8	46.4	41.8	38.0	34.6	0	0	0	0
23	4.10	9.36	17.4	32.6	46.9	60.7	87.6	113	138	164	139	115	96.1	82.1	71.1	62.4	55.4	49.5	44.7	40.5	37.0	0	0	0	0
24	4.29	9.83	18.2	34.1	49.1	63.7	91.7	119	145	172	149	122	102	87.4	75.8	66.5	59.0	52.8	47.6	43.2	28.8	0	0	0	0
25	4.49	10.3	19.0	35.7	51.4	66.5	95.9	124	152	178	158	130	109	92.9	80.6	70.7	62.8	56.2	50.6	46.0	0	0	0	0	0
26	4.68	10.7	20.0	37.1	53.6	69.5	100	130	158	186	169	138	115	98.6	85.4	75.0	66.5	59.5	53.6	48.7	0	0	0	0	0
28	5.07	11.6	21.6	40.4	58.1	75.2	108	141	172	202	188	154	129	110	95.5	83.8	74.3	66.5	59.9	41.4	0	0	0	0	0
30	5.47	12.5	23.2	43.4	62.5	81.0	117	152	185	217	209	170	143	122	106	92.9	82.5	73.8	66.5	0	0	0	0	0	0
32	5.86	13.4	24.9	46.5	67.1	86.9	125	162	198	233	229	188	158	134	117	102	90.8	81.3	59.0	0	0	0	0	0	0
35	6.45	14.8	27.5	51.2	73.9	95.7	138	178	219	257	263	216	181	154	134	117	104	92.9	0	0	0	0	0	0	0
40	7.46	17.0	31.8	59.3	85.3	110	160	207	252	298	322	263	220	188	164	143	112	0	0	0	0	0	0	0	0
Lubrication	I					II					III														

Remarks) 1. For HP rating of multiple strand, multiply the HP above by multiple strand factor shown in the table at right.
2. The operation in right part of the dotted line is not recommended.
3. The lubrication type is as follows: Type I: Manual & Dip feed; Type II: Oil bath and Dip; Type III: Pump
4. Dimensions & Ratings are subject to change without notice. Certified dimensions furnished upon request.

Number of Strands	2	3	4	5	6
Multiple Strand Factors	1.7	2.5	3.3	3.9	4.6

Figura 29. Transmisión de Potencia para cadenas de rodillos

Fuente: (ITERMEC, 2021)

Selección del piñón Conducido. Para la selección del piñón Loco se tomarán los mismos valores del piñón conductor ya que ambos van a trabajar sobre la misma cadena y este no va a soportar ninguna tensión directa ejercida por el sistema. Numero de dientes igual a 25 y un paso de 38.1 mm.

4.8 Dimensionamiento de las columnas del bastidor.

Para las condiciones encontradas en este estudio, la máxima fuerza que soporta la perforadora corresponde a la fuerza de empuje necesaria para taladrar el suelo. Este valor es 46.7 kN.

Al tomar un factor de seguridad de 1.5, es posible estimar la carga crítica (P_{crit}) que produce el pandeo en la columna y con base en este valor se dimensiona la misma. La siguiente figura (Figura 30) muestra las condiciones de carga y de apoyo que soportaría la columna.

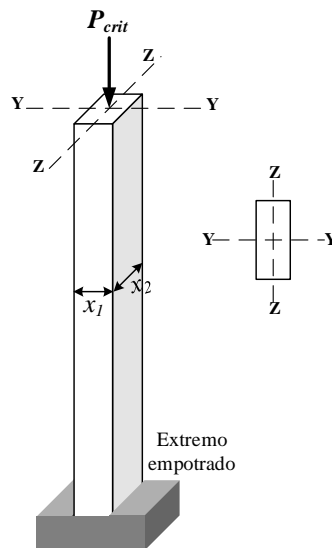


Figura 30. Esquema para dimensionar las columnas del bastidor.

Fuente: Autor de Proyecto

Para el análisis de la columna se considera una condición de empotramiento-articulación en el caso del momento de inercia en el eje Z-Z, y empotramiento-libre en el caso del momento de inercia con el eje Y-Y.

Acorde a lo planteado por (Budynas & Nisbett, 2012) bajo la suposición de una columna larga, la siguiente ecuación puede usarse para estimar la carga crítica que produce pandeo:

$$\frac{P_{\text{crit}}}{A} = \frac{C \times \pi^2 \times E}{\left(\frac{L}{k}\right)_R^2} \quad \text{Ecu. 10}$$

Donde

P_{crit} es la carga que produce el pandeo. Para las condiciones analizadas aquí su valor es 1.5×46.7 , lo cual equivale a 70.05 kN.

A representa el área de la sección transversal de la columna. Para el caso mostrado en la figura anterior corresponde a la multiplicación de $x_1 \times x_2$

C es la condición de extremos. Para el sistema empotramiento-articulación su valor es 1.2, mientras que en el caso de empotrado-libre es 0.25.

E corresponde al módulo de elasticidad, en el caso de aceros es $207 \cdot 10^9$ Pa.

L es la longitud de la columna, en este caso 2.37 m.

k representa el radio de giro. El cálculo de este parámetro viene dado por $k = \sqrt{I/A}$

I es el momento de inercia de la sección transversal.

Por otra parte, al parámetro $\left(\frac{L}{k}\right)$ se le conoce como relación de esbeltez. El subíndice “R” indica que corresponde al valor calculado con las dimensiones de la sección transversal. Acorde a lo planteado en (Budynas & Nisbett, 2012), esta relación indica si una columna se puede considerar “larga” o “corta” mediante la estimación de un valor característico $\left(\frac{L}{k}\right)_1$ definido por la siguiente ecuación:

$$\left(\frac{L}{k}\right)_1 = \left(\frac{2 \times \pi^2 \times C \times E}{s_y}\right)^{0.5} \quad \text{Ecu. 11}$$

Donde

s_y es la resistencia a la fluencia del material seleccionado. Para el caso de este estudio, se tomó un acero comercial 1030 estirado en caliente cuya resistencia a la fluencia es 260 MPa (Budynas & Nisbett, 2012).

Para una columna con carga centrada, si $\left(\frac{L}{k}\right)_R > \left(\frac{L}{k}\right)_1$, la columna se trabaja mediante la ecuación de Euler (Ecu 8), de lo contrario de utiliza la fórmula de J.B. Johnson para columnas “cortas” (Budynas & Nisbett, 2012).

De la ecuación 11 se tiene:

$$\left(\frac{L}{k}\right)_1 = \left(\frac{2 \times \pi^2 \times 1.2 \times 207 \cdot 10^9}{260 \cdot 10^6}\right)^{0.5}$$

$$\left(\frac{L}{k}\right)_1 = 137.32$$

Para el plano de pandeo XY, el momento de inercia de una sección rectangular con respecto al eje Z-Z viene dado por:

$$I_{z-z} = \frac{x_1^3 \times x_2}{12}$$

El radio de giro en Z es

$$k_z = \sqrt{\frac{\frac{x_1^3 \times x_2}{12}}{x_1 \times x_2}} \rightarrow k_z = \frac{x_1}{\sqrt{12}}$$

La relación de esbeltez para el plano de pandeo analizado es

$$\left(\frac{L}{k_z}\right) = \frac{\sqrt{12} \times L}{x_1}$$

Al aplicar la ecuación 10 se tiene:

$$\frac{P_{\text{crit}}}{x_1 \times x_2} = \frac{1.2 \times \pi^2 \times 207 \cdot 10^9}{\frac{12L^2}{x_1^2}}$$

Para el plano de pandeo XZ, el momento de inercia de una sección rectangular con respecto al eje Y-Y viene dado por:

$$I_{y-y} = \frac{x_1 \times x_2^3}{12}$$

El radio de giro en Y es

$$k_y = \sqrt{\frac{\frac{x_1 \times x_2^3}{12}}{x_1 \times x_2}} \rightarrow k_y = \frac{x_2}{\sqrt{12}}$$

La relación de esbeltez para el plano de pandeo analizado es

$$\left(\frac{L}{k_y}\right) = \frac{\sqrt{12} \times L}{x_2}$$

Al aplicar la ecuación XZ se tiene:

$$\frac{P_{\text{crit}}}{x_1 \times x_2} = \frac{0.25 \times \pi^2 \times 207 \cdot 10^9}{\frac{12L^2}{x_2^2}}$$

El diseño más eficiente de la columna corresponde al caso en que para los diferentes planos de pandeo se tiene el mismo valor del “Esfuerzo crítico”, lo cual se logra al igualar las siguientes expresiones:

$$\frac{1.2 \times \pi^2 \times 207 \cdot 10^9}{\frac{12L^2}{x_1^2}} = \frac{0.25 \times \pi^2 \times 207 \cdot 10^9}{\frac{12L^2}{x_2^2}}$$

$$\frac{x_2}{x_1} = 2.19 \rightarrow x_2 = 2.19x_1$$

Para estimar los valores de x_1 y x_2 se utiliza la relación anterior (Ecuación 11), esto es:

$$\frac{70050}{2.19x_1^2} = \frac{1.2 \times \pi^2 \times 207 \cdot 10^9}{\frac{12L^2}{x_1^2}}$$

$$x_1^4 = \frac{70050 \times 12 \times 2.37^2 \times}{2.19 \times 1.2 \times \pi^2 \times 207 \cdot 10^9} \rightarrow x_1^4 = 879 \cdot 10^{-9} \text{ m}^4$$

$$x_1 = 0.03062 \text{ m} = 30.62 \text{ mm}$$

Entonces, el valor de x_2 es 67.05 mm.

Al seleccionar un perfil comercial de las tablas de (Mott et al., 2018), se tienen las siguientes dimensiones estándar:

$$x_1 = 50 \text{ mm}$$

$$x_2 = 150 \text{ mm}$$

$t = 4 \text{ mm}$; representa el espesor del perfil seleccionado

$I_z = 6.858 \cdot 10^5 \text{ mm}^2$; corresponde al menor momento de inercia de la sección transversal que es susceptible de pandeo.

Con las dimensiones del perfil definidas, se calcula la relación de esbeltez para determinar si es una columna de Euler o de J.B. Johnson.

$$\left(\frac{L}{k}\right)_R = \frac{2370}{\sqrt{\frac{6.858 \cdot 10^5}{50 \times 150}}} \rightarrow \left(\frac{L}{k}\right)_R = 248$$

Dado que $\left(\frac{L}{k}\right)_R > \left(\frac{L}{k}\right)_1$ ($248 > 137.32$) la columna se puede trabajar como con la ecuación de Euler.

Al recalculer la carga crítica con base en el perfil comercial definido, se tiene:

$$P_{\text{crit}} = \frac{1.2 \times \pi^2 \times 207 \cdot 10^9 \times (0.05 \times 0.150)}{248^2}$$

$$P_{\text{crit}} = 298.95 \text{ kN}$$

Dado que la carga crítica recalculada es mayor que la de diseño, la columna puede considerarse adecuada; por tanto, la situación de análisis es adecuada para el caso de estudio.

4.9 Análisis de esfuerzos sobre la plataforma

Para realizar el análisis de los esfuerzos dados en los soportes de la estructura se toman el carro deslizante y la cabeza de perforación como un todo (un solo elemento) que está unido al sistema. De esta manera, lo que se quiere estudiar es el comportamiento mecánico de la plataforma de perforación cuando el mecanismo se encuentra en la parte más “crítica”, la cual se da cuando la cabeza de perforación se encuentra en la parte superior. Para realizar un estudio

más completo del sistema del comportamiento en los apoyos de la estructura, se van a calcular las reacciones y los momentos a los que se somete la estructura.

$$+\circlearrowleft \sum M_0 = 0 \quad \text{Ecu. 12}$$

$$+\rightarrow \sum F_x = 0 \quad \text{Ecu. 13}$$

$$+\uparrow \sum F_y = 0 \quad \text{Ecu. 14}$$

Para realizar los cálculos pertinentes a este estudio, la situación de carga se esquematiza (Figura 31) con las dimensiones propuestas.

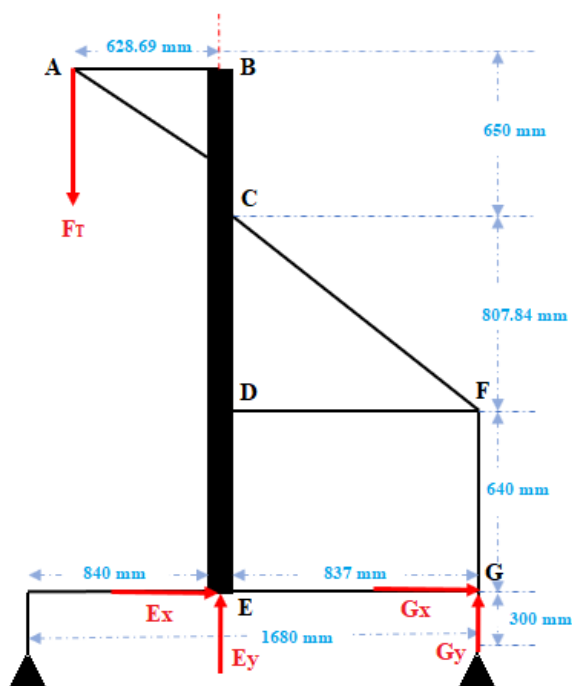


Figura 31. Vista Lateral Izquierda de la Estructura.

Fuente: Autor de Proyecto

La Fuerza Total denominada como F_T , sería la sumatoria de las fuerzas del sistema (pesos de cada elemento) F_{sist} , más la fuerza de trabajo antes hallada, también haría parte el peso del motor Hidráulico de perforación $W_{Mot-Rot}$; esto sería:

$$W_{Mot-rot} = 6562.86 \text{ gramos}$$

$$F_{Mot-Rot} = W_{Mot-rot} \times 9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

$$F_{Mot-Rot} = 0.06436 \text{ kN}$$

Por consiguiente, la fuerza total a soportar la estructura en el punto de rotación sería la siguiente:

$$F_T = F_{sist} + F_{trabajo} + F_{Mot-Rot}$$

$$F_T = 13.88 \text{ kN} + 46.7 \text{ kN} + 0.06436 \text{ kN}$$

$$\mathbf{F_T = 60.64 \text{ kN}}$$

Para el análisis se debe tener en cuenta una consideración importante; que la barra CF ejerce una fuerza que es compartida entre los elementos DF y FG, por tanto, se tomará una fuerza equivalente denominada F_{CG} , la cual teóricamente es superior a la que soporta el elemento. Esta forma de análisis se aborda con el propósito de reducir incógnitas en el sistema.

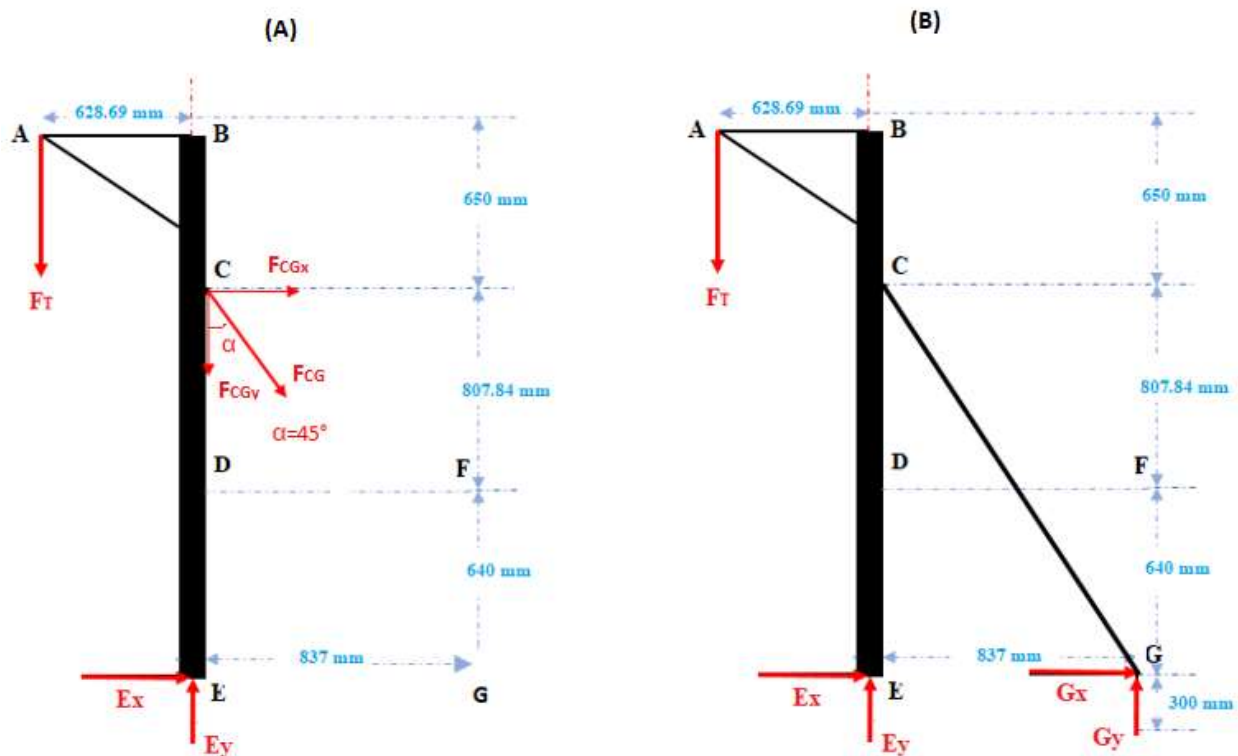


Figura 32. Diagramas de cuerpo rígido

Fuente: Autor del Proyecto

Como se aprecia en la Figura 32, (A); la fuerza resultante F_{CG} , sería entonces mediante la ecuación 12 de la siguiente manera:

$$+\circlearrowleft \sum \mathbf{M}_E = 0; \quad 60.64 \text{ kN} (0.628 \text{ m}) - F_{CGx} (1.447 \text{ m}) = 0$$

$$F_{CGx} = \frac{60.64 \text{ kN} \times (0.628 \text{ m})}{1.447 \text{ m}}$$

$$F_{CGx} = 26.3467 \text{ kN}$$

$$F_{CG} = \frac{60.64 \text{ kN} \times (0.628 \text{ m})}{1.447 \text{ m} \times (\text{sen } 45^\circ)}$$

$$F_{CG} = 37.22 \text{ kN}$$

De la ecuación 13, se obtiene que E_y sería:

$$+\uparrow \sum F_y = 0$$

$$E_y - 60.64 \text{ kN} - F_{CG}(\cos 45) = 0$$

$$E_y = 60.64 \text{ kN} + 37.22 \text{ kN} (\cos 45)$$

$$\mathbf{E_y = 86.96 \text{ kN}}$$

Aplicando la ecuación 14, se tiene que:

$$+\rightarrow \sum F_x = 0$$

$$E_x + F_{CG}(\sen 45) = 0$$

$$E_x = -37.22 \text{ kN} (\sen 45)$$

$$E_x = -26.32 \text{ kN}$$

$$\mathbf{E_x = 26.32 \text{ kN} \leftarrow (\text{Dirección})}$$

Por tanto, la magnitud de la fuerza en el apoyo E sería la siguiente:

$$E = \sqrt{(E_x)^2 + (E_y)^2}$$

$$E = \sqrt{(26.32)^2 + (86.96)^2}$$

$$\mathbf{E = 90.85 \text{ kN}}$$

Del diagrama de cuerpo libre de la Figura 32 (B) se tiene que:

$$+\uparrow \sum F_y = 0$$

$$E_y + G_y - 60.64 \text{ kN} = 0$$

$$G_y = 60.64 \text{ kN} - 86.96 \text{ kN}$$

$$G_y = -26.32 \text{ kN}$$

$$\mathbf{G_y = 26.32 \text{ kN} \downarrow \text{(Dirección)}}$$

$$+\rightarrow \sum \mathbf{F_x} = \mathbf{0}$$

$$E_x + G_x = 0$$

$$G_x = -(-26.32 \text{ kN})$$

$$\mathbf{G_x = 26.32 \text{ kN}}$$

La magnitud de la fuerza en el apoyo G sería la siguiente:

$$G = \sqrt{(G_x)^2 + (G_y)^2}$$

$$G = \sqrt{(26.32)^2 + (-26.32)^2}$$

$$\mathbf{G = 37.22 \text{ kN}}$$

Para el caso de estudio se tomará un perfil cuadrado de 60mm × 60mm; su análisis se basa en un esfuerzo normal (σ_{Normal}) que está soportado por la diagonal CG mencionada anteriormente. Para este análisis se utilizará la ecuación 15 que representa el cociente entre la carga aplicada y el área de la sección transversal inicial, esto es:

$$\sigma_{\text{Normal}} = \frac{P}{A_0} \quad \text{Ecu. 15}$$

Donde,

P es la carga que se le aplica a la superficie en N, A_0 es el área de la sección transversal en m^2 y el esfuerzo σ_{Normal} debido a cargas axiales sobre el elemento en cuestión en Pascales.

El Área de la sección transversal del tubo 60mm \times 60mm con espesor de 4 mm es la parte sombreada de la *Figura 33*.

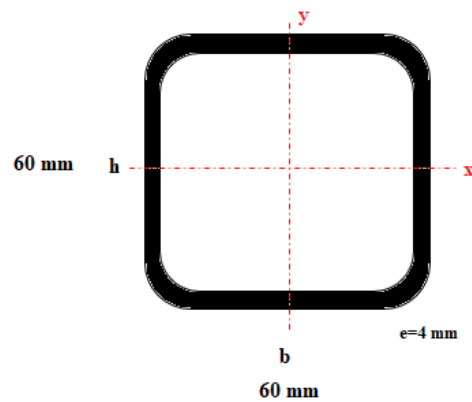


Figura 33. Perfil 60mm \times 60mm \times 4mm

Fuente: Autor del Proyecto

El área entonces sería:

$$A_0 = A_T - A_{interna}$$

$$A_0 = (0.06m \times 0.06m) - (0.052m \times 0.052m)$$

$$A_0 = 8.96 \times 10^{-4} m^2$$

El esfuerzo corresponde a:

$$\sigma_{Normal} = \frac{37220 N}{8.96 \times 10^{-4} m^2}$$

$$\sigma_{\text{Normal}} = 41.54 \text{ MPa}$$

Para el cálculo de la resistencia a la fluencia se asume un factor de seguridad de 1.5 y se utilizaría la teoría del esfuerzo cortante máximo que se representa mediante la ecuación 16; como se muestra a continuación.

$$\sigma_{\text{Normal}} = \frac{S_y}{2n} \quad \text{Ecu. 16}$$

El esfuerzo normal sería igual al cociente entre la resistencia a la fluencia y 2 veces el factor de seguridad; por consiguiente, la resistencia a la fluencia sería:

$$S_y = \sigma_{\text{Normal}} \times 2n$$

$$S_y = 41.54 \text{ MPa} \times (2 \times 1.5)$$

$$\mathbf{S_y = 124.62 \text{ MPa}}$$

Recurriendo a tablas de propiedades de materiales se selecciona un Acero 1020 laminado en caliente el cual posee una resistencia a la fluencia de 180 MPa (Mott et al., 2018) y (Budynas & Nisbett, 2012); estando muy cerca a nuestro valor; este perfil cuadrado hueco debe tener dimensiones de 60mm × 60mm × 4mm .

4.10 Diseño estructural realizado en SolidWorks

El diseño que se quiere se modela de acuerdo con el mecanismo y torre de perforación más adecuados. El sistema general de la máquina se realiza de acuerdo a las condiciones de carga descritas con anterioridad, así como las dimensiones establecidas. La estructura debe soportar las

fuerzas internas de trabajo producto de las cargas externas. Acorde al diseño conceptual definido en la sección 4.3 (*Figura 19*) se realizó el CAD de este esquema como se muestra en la *Figura*

34.

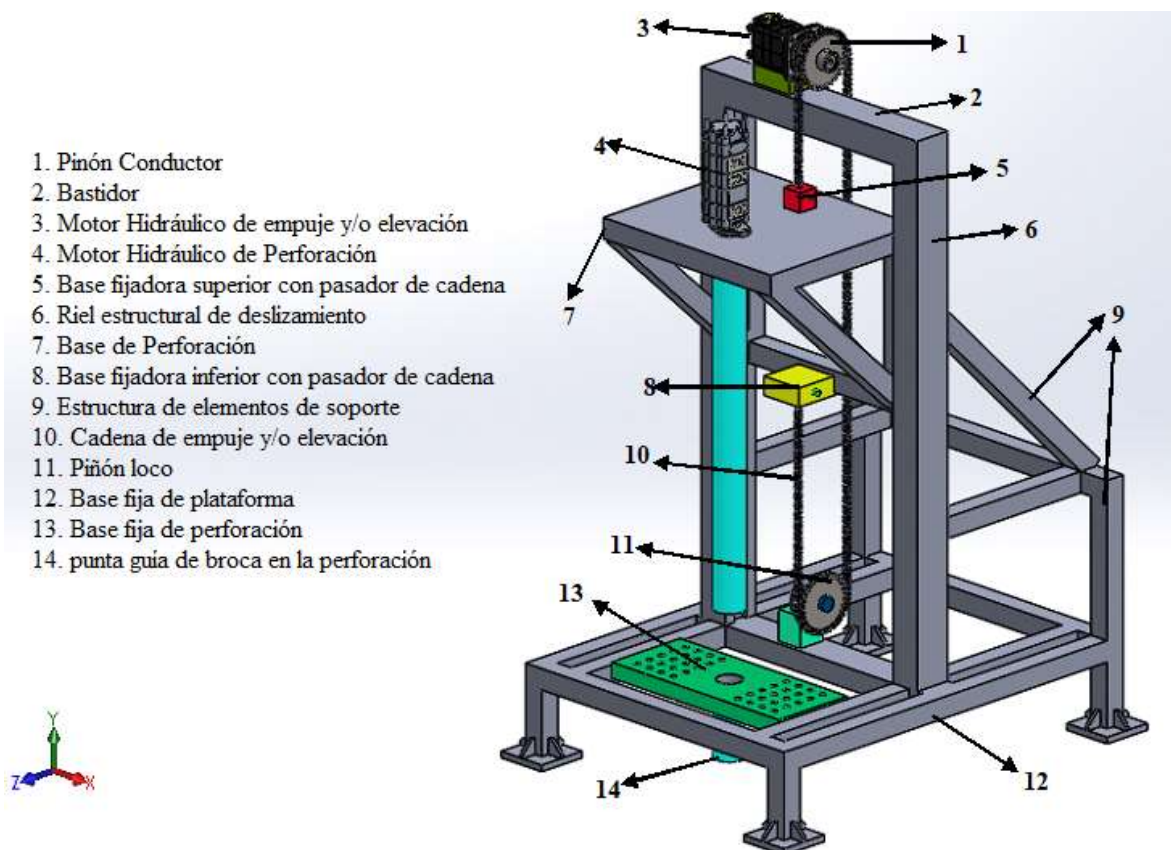


Figura 34. Diseño en de la plataforma en SolidWorks.

Fuente: Autor del Proyecto

La estructura está formada por sistemas que el funcionamiento adecuado de la misma. Posee una la base de perforación donde se ubica el taladro perforador, un motor hidráulico que realiza el trabajo por medio de un motor superior denominado “motor Hidráulico de elevación y empuje” que transmite potencia mediante fuerzas de tracción de una cadena que eleva e impulsa al agente perforador.

Además, existen dos piñones (piñón Conductor y piñón loco) que ayudan a que la transmisión de potencia se realice de forma adecuada; como se aprecia en la *Figura 35*.

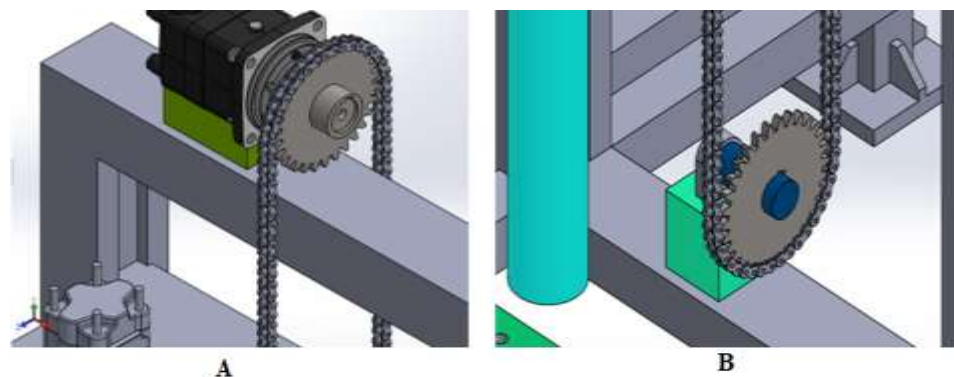


Figura 35. (A) Piñón Conductor, (B) Piñón Loco

Fuente Autor Proyecto

La cadena cumple un papel fundamental en el diseño; ya que es la encargada de la elevación y el empuje de la cabeza de perforación. Esta tiene dos sujeciones fijas con pasador directo a la cadena que dan sujeción a la estructura móvil, la *Figura 36* muestra los dos elementos fijos, uno superior sub-figura A y el inferior sub-figura B; veamos

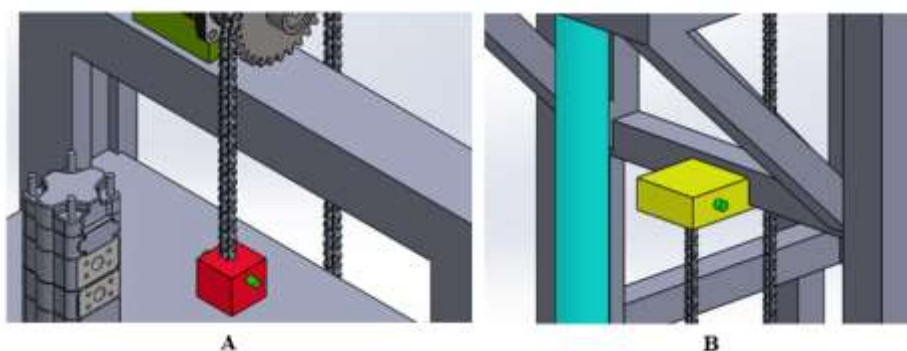


Figura 36. Sujeciones cadena-Base de perforación

Fuente: Autor de Proyecto

De esta manera se identifican los elementos más importantes en el funcionamiento de la plataforma de perforación hidráulica realizados en el Diseño.

4.11 Simulación mediante Software CAD/CAE (SolidWorks)

Como se indicó la simulación se realiza mediante los parámetros en el diseño establecidos por el Autor. SolidWorks Simulation es una herramienta que utiliza el método de elementos finitos para para realizar análisis estructurales mediante estudios estáticos o “dinámicos”. Esta herramienta permite analizar las condiciones de esfuerzo que soporta el modelo de estudio proporcionando el estado de esfuerzos del mismo, lo que permite al diseñador evaluar su diseño. Además, es posible evaluar diferentes condiciones de carga que den al diseñador rangos de operación segura del diseño realizado.

La *Figura 37* muestra un diagrama de flujo del procedimiento necesario para realizar el análisis del sistema bajo estudio.

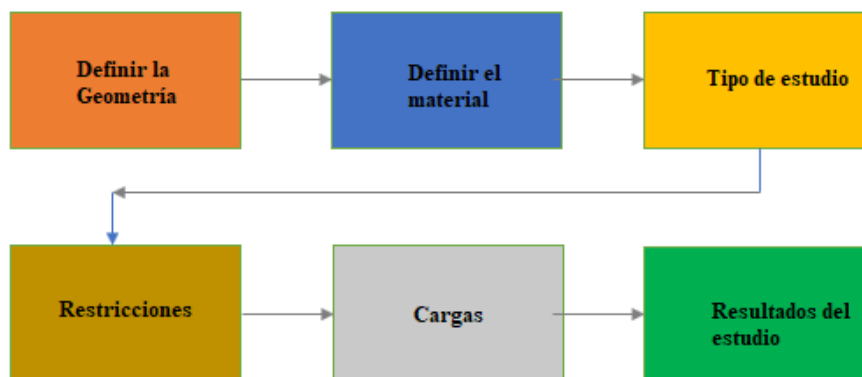


Figura 37. Pasos para generar un estudio de Simulación.

Fuente: Autor de Proyecto

Este proyecto crea dos casos de análisis de simulación; el primer estudio se le realiza a la estructura y/o armadura de la plataforma permitiendo establecer las zonas que probablemente con el material establecido fallarían en su vida útil. El segundo análisis se realizar al conjunto estructura y cabeza de perforación como un solo sólido.

4.11.1 Caso 1: Simulación de la estructura y/o armadura. En este estudio se realizó un análisis estático de la estructura para las condiciones de carga encontradas y definidas en secciones anteriores. Los parámetros de trabajo se muestran en la siguiente tabla donde se observan dos Figuras.

La *Figura 38* representa la condición de carga que soporta la estructura en el momento justo de la simulación e indica a su vez el mallado fino que se estableció según criterio del Autor.



 <p style="text-align: center;">Nombre del modelo: Estructura plataforma de perforacion</p>		
Nombre de documento y referencia	Tratado como	Propiedades volumétricas
Sólido importado 	Estructura Sólida	Masa: 119938 gr Volumen: 0.203133 m ³ Densidad: 7870 kg/m ³ Peso: 1176.11 N

Figura 38. Información de modelo 1 para el análisis mediante SolidWorks
Fuente: Autor de Proyecto

El estudio estático arrojó resultados en la estructura sólida de Masa = 119.938 kg; tensiones, desplazamiento, Deformación y Factor de seguridad.

A continuación, en la *Figura 39* se observa las propiedades del material en que se evalúa la plataforma.

Referencia de modelo	Propiedades	Componentes
	<p>Nombre: AISI 1030 Acero laminado en caliente</p> <p>Tipo de modelo: Isotrópico elástico lineal</p> <p>Criterio de error predeterminado: Tensión de Von Mises máx.</p> <p>Límite elástico: 2.826e+008 N/m²</p> <p>Límite de tracción: 5.85e+008 N/m²</p> <p>Módulo elástico: 2.05e+011 N/m²</p> <p>Coefficiente de Poisson: 0.29</p> <p>Densidad: 7870 kg/m³</p> <p>Módulo cortante: 8e+010 N/m²</p> <p>Coefficiente de dilatación térmica: 1.17e-005 /Kelvin</p>	<p>Sólido 1(Sólido importado1) (Estructura plataforma de perforación)</p>

Figura 39. Propiedades del Material para el caso 1

Fuente: Autor del Proyecto

La estructura de la plataforma de perforación tiene un material de acero estirado en caliente. El riel por donde desliza la base de perforación es de Acero 1030 laminado en caliente. Para las sujeciones se realizaron una de tipo fija en las cuatro bases de la estructura, al igual que la fuerza aplicada en el bastidor superior (ver *Figura 40* y *Figura 41*).

La *Figura 40* muestra el bastidor que soporta una fuerza vertical de 70050 N distribuida en todo el perfil superior de riel por donde desliza la base perforadora.


Nombre de sujeción	Imagen y detalle de sujeción			
Fijo	 <p>Entidades: 4 cara(s) Tipo: Geometría fija</p>			
Fuerzas resultantes				
Componentes	X	Y	Z	Resultante
Fuerza de reacción (N)	0.0635366	70049.8	0.573722	70049.8

Figura 40. Sujeción aplicada a la estructura en el estudio 1

Fuente: Autor del Proyecto


Nombre de carga	Cargar imagen	Detalles de carga
Fuerza		<p>Entidades: 1 cara(s) Tipo: Aplicar fuerza normal al bastidor Valor: 70050 N</p>

Figura 41. Carga aplicada al bastidor

Fuente: Autor del Proyecto

La Figura 42 caracteriza el sólido a realizar el estudio de simulación, realizado mediante el software un mallado supremamente fino dando resultados con poco margen de errores en el posible funcionamiento en el campo de aplicación de la estructura de perforación, veamos


Contacto	Imagen del contacto	Propiedades del contacto
Contacto global		Tipo: Unión rígida Componentes: 1 Opciones: Mallado compatible Fino Máximo

Figura 42. Contacto entre la fuerza y el mallado para el caso 1

Fuente: Autor del Proyecto

SolidWorks simulation aplica al diseño una malla fina y sólida estimando la cantidad de nodos necesarios con base en las condiciones de carga. Las características de esta malla se muestran en *Figura 43*.

Tipo de malla	Malla sólida
Mallador utilizado:	Malla estándar
Puntos jacobianos	4 puntos
Tamaño de elementos	29.6345 mm
Tolerancia	1.48172 mm
Trazado de calidad de malla	Elementos cuadráticos de alto orden
Número total de nodos	102873
Número total de elementos	60890
Cociente máximo de aspecto	5.1315
% de elementos cuyo cociente de aspecto es < 3	99.6
% de elementos cuyo cociente de aspecto es > 10	0
% de elementos distorsionados (Jacobiana)	0
Tiempo para completar la malla (hh:mm:ss):	00:00:13
Nombre de computadora:	Toshiba Satélite

Nombre del nodo: Estructura con 21000000
Nombre de elemento: Aluminio estándar (Predefinido)
Tipo de malla: Malla sólida




Figura 43. Característica de la malla utilizada

Fuente: Autor del Proyecto

En la simulación con el software se utilizó un mallado fino ya que esto permite que los valores sean cercanos entre sí. Arrojando como resultado una tolerancia entre nodos de 1.54 mm, como se puede apreciar en el estudio realizado.

El software arroja valores en cuanto a masa ubicada en el perfil del bastidor, la condición de esfuerzo acorde al criterio de Von Mises, al igual que la deformación de la pieza.

A continuación, se observa en la *Figura 44* el esfuerzo de Von Mises (teoría de falla de materiales) para valores mínimos y máximos del estado de esfuerzos en una escala de 1:1 expresada mediante criterio del diseñador.

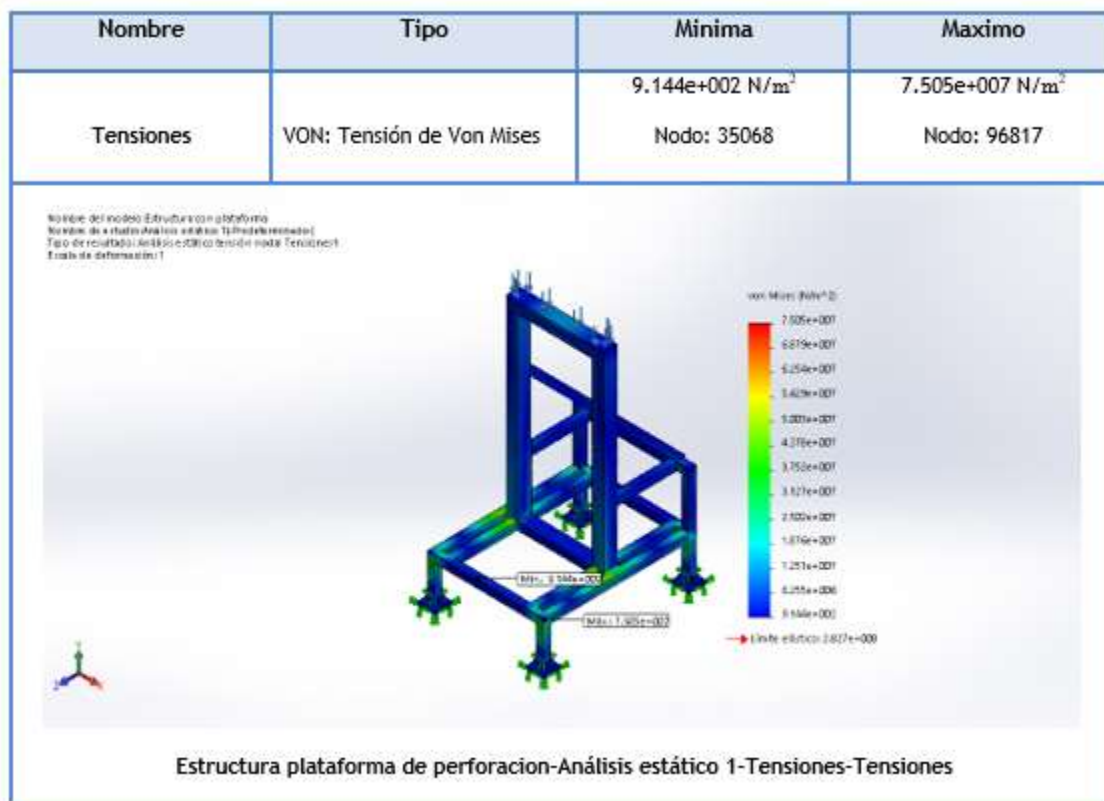


Figura 44. Tensión Von Mises, Caso 1

Fuente: Autor del Proyecto

Las zonas en color rojo muestran aquellos valores altos del esfuerzo dando paso a zonas intermedias (color verde) que predicen el funcionamiento adecuado de la estructura. Por otra parte, se muestran zonas de bajo esfuerzo dadas en color azul, que indican resultados favorables en el diseño.

En La *Figura 45* se expresan los resultados la deformación que produce la condición de carga sobre la estructura. La parte superior del bastidor tiene un valor máximo de 1.857 mm puesto que es el lugar donde se aplica la mayor condición de carga.

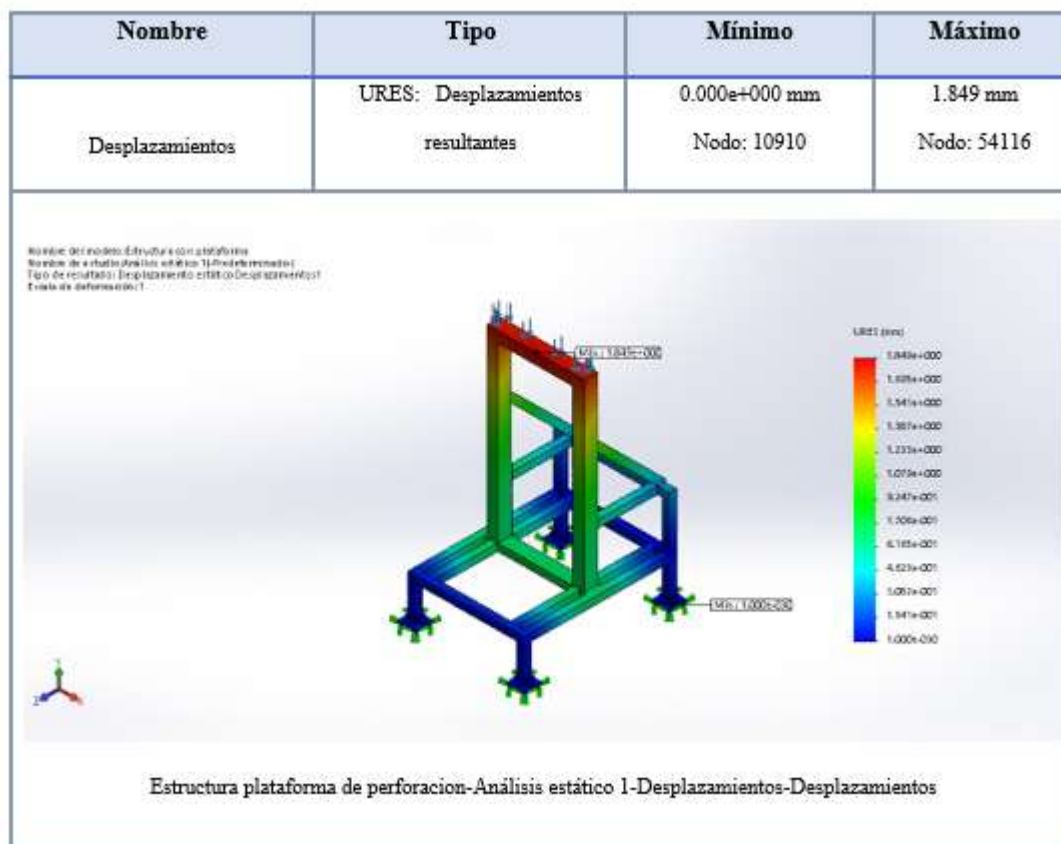


Figura 45. Deformación de la estructura para las condiciones de estudio.

Fuente: Autor del Proyecto

La *Figura 46* da a conocer donde se dan las deformaciones unitarias de la estructura, para ello se observan la transición de colores que representan zonas con deformación considerable.

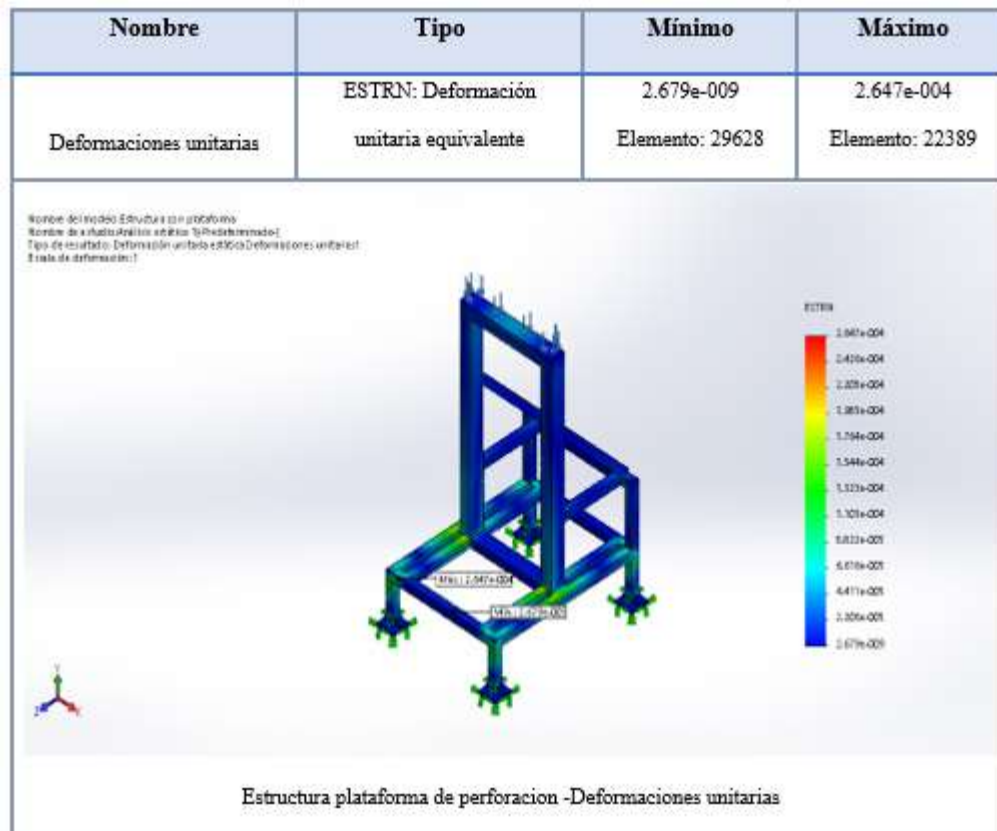


Figura 46. Máximos y mínimos deformados

Fuente: Autor del Proyecto

Las deformaciones unitarias se presentan en la base de la estructura, más específico en el elemento posterior del diseño. Estas deformaciones unitarias no son más que la relación entre la deformación total de la estructura y la longitud de cada elemento que contiene el sólido estructural.

A continuación, la *Figura 47* evidencia el factor de seguridad arrojado por la simulación de forma automática en cada nodo según el criterio de falla aplicado. En este caso, se muestra un

factor de seguridad mínimo de 3.8; es decir que en la región de mayor carga que experimenta la estructura está es capaz de soportar 3.8 veces su valor.

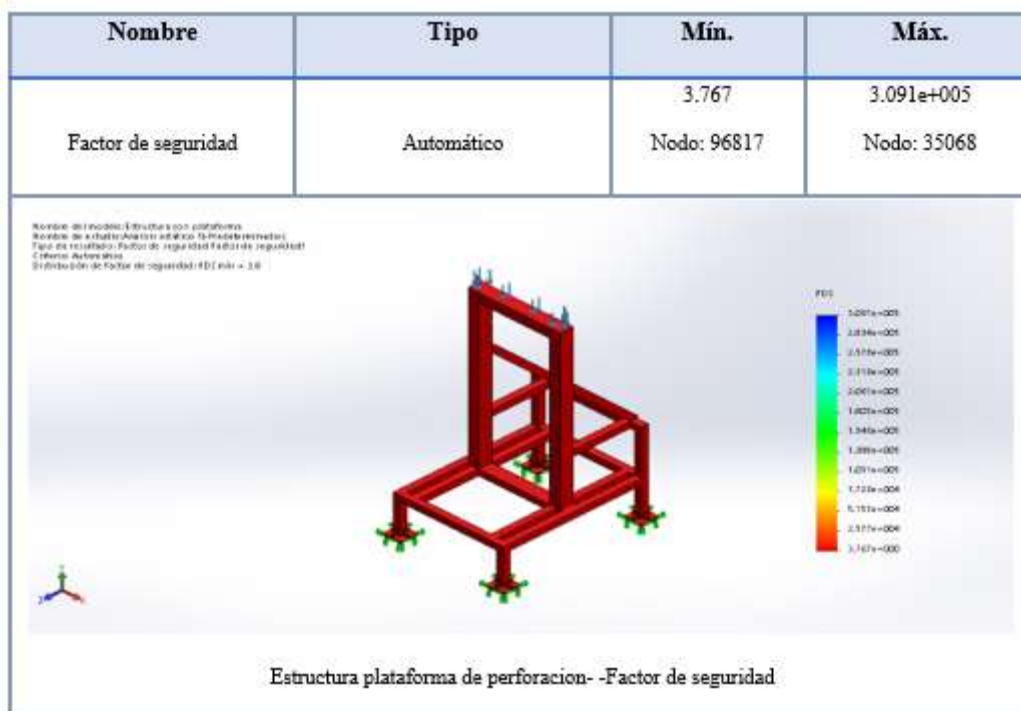


Figura 47. Factor de Seguridad del estudio 1

Fuente: Autor del Proyecto

4.11.2 Caso 2: Simulación de estructura y cabeza de perforación (sólido). Este estudio de simulación va en marcado y realizado en el punto más crítico del trabajo de perforación, la base móvil está en la parte alta del riel de la estructura; por criterio del diseñador de realizan tres estudios con SolidWorks simulation que permitan dar un posible funcionamiento correcto de la plataforma; un estudio estático, un análisis de Pandeo y por ultimo un estudio de frecuencias para determinar aquellas resonancias que muy probablemente pueda conllevar la plataforma de perforación Hidráulica en la hora de trabajo y extracción de agua.

4.11.2.1 *Análisis Estático.* De manera similar al caso 1, se limita el diseño definiendo su material, el respectivo estudio estático de deformaciones y desplazamiento, se establecen las restricciones en su movimiento habitual, se incorporan las fuerzas que afectan la estructura y por último se tienen los resultados del estudio realizado.

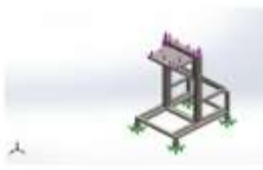
Nombre del modelo: Estructura plataforma de perforacion		
Nombre de documento y referencia	Tratado como	Propiedades volumétricas
Sólido importado 	Estructura Sólida	Masa: 175638 gr Volumen: 0.2516 m ³ Densidad: 7870 kg/m ³ Peso: 1723.0 N

Figura 48. Información de modelo 1 para el análisis mediante SolidWorks.

Fuente: Autor del Proyecto

Como se menciona anteriormente en la *Figura 48*, el modelo para propósitos de simulación debe evaluarse como un sólido producto del ensamble de la estructura y la cabeza de perforación ubicado en la parte superior donde la plataforma podría experimentar una mayor carga: la *Figura 49* muestra las propiedades del material dadas por el software mediante criterio del Autor del Proyecto.

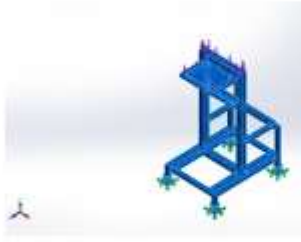
Referencia de modelo	Propiedades	Componentes
	<p>Nombre: AISI 1030 Acero laminado en caliente</p> <p>Tipo de modelo: Isotrópico elástico lineal</p> <p>Criterio de error predeterminado: Tensión de Von Mises máx.</p> <p>Límite elástico: 2.826e+008 N/m²</p> <p>Límite de tracción: 5.85e+008 N/m²</p> <p>Módulo elástico: 2.05e+011 N/m²</p> <p>Coefficiente de Poisson: 0.29</p> <p>Densidad: 7870 kg/m³</p> <p>Módulo cortante: 8e+010 N/m²</p> <p>Coefficiente de dilatación térmica: 1.17e-005 /Kelvin</p>	<p>Sólido 1(Sólido importado 1) (Estructura plataforma de perforación ensamblada con cabeza de perforación)</p>

Figura 49. Propiedades del material, Caso 2

Fuente: Autor del Proyecto

Para realizar el estudio 2 de simulación la sujeción fija se realiza igual al caso dos; aplicada en la base de la estructura como se puede evidenciar en la *Figura 50*.


Nombre de sujeción	Imagen y detalle de sujeción			
Fijo	 <p data-bbox="711 741 1013 768">Entidades: 4 cara(s)</p> <p data-bbox="737 793 1057 821">Tipo: Geometria fija</p>			
Fuerzas resultantes				
Componentes	X	Y	Z	Resultante
Fuerza de reacción (N)	-0.238209	72851.9	-1.5278	72851.9

Figura 50. Sujeción aplicada a la estructura

Fuente: Autor del Proyecto

Las cargas que se aplican en el sólido del caso 2 van distribuidas en dos elementos de la misma estructura. El primero corresponde a la cabeza de perforación que se desliza y que toma la máxima posición, la otra parte se aplica en el bastidor producto de la fuerza ejercida por la cadena transmitida por el piñón conductor ubicado en el motor de elevación, esto se observa en la Figura 51.



Nombre de carga	Imagen	Detalles de carga
Fuerza 1		Entidades: 1 cara(s) Tipo: Aplicar fuerza normal al bastidor Valor: 2800 N
Fuerza 2		Entidades: 1 cara(s) Tipo: Aplicar fuerza normal a la cabeza de perforación Valor: 70050 N

Figura 51. Cargas aplicadas a la estructura

Fuente: Autor del Proyecto

Mediante criterio propio del diseñador se asume que las superficies soportan las fuerzas de manera distribuidas.

La Figura 52 evidencia que el modelo de estudio es un sólido rígido formado por dos elementos del diseño (la estructura y la base de perforación).


Contacto	Imagen del contacto	Propiedades del contacto
Contacto global		Tipo: Unión rígida Componentes: 1 Opciones: Mallado compatible Fino Máximo

Figura 52. Contacto entre las Fuerzas y el Mallado, Caso de estudio 2

Fuente: Autor del Proyecto

El mallado fino crea por defecto en el programa 90599 nodos arrojando una tolerancia máxima en el cálculo de 1.64 mm. En Figura 53 se dan las características generales de la malla sólida preestablecida por el Autor al momento de generar el estudio en el caso 2.

Tipo de malla	Malla sólida
Mallador utilizado:	Malla estándar
Puntos jacobianos	4 puntos
Tamaño de elementos	32.8222 mm
Tolerancia	1.64111 mm
Trazado de calidad de malla	Elementos cuadráticos de alto orden
Número total de nodos	90599
Número total de elementos	52610
Cociente máximo de aspecto	7.5358
% de elementos cuyo cociente de aspecto es < 3	99.5
% de elementos cuyo cociente de aspecto es > 10	0
% de elementos distorsionados (Jacobiana)	0
Tiempo para completar la malla (hh:mm:ss):	00:00:12
Nombre de computadora:	Toshiba Satélite




Figura 53. Característica de la Malla Utilizada

Fuente: Autor del proyecto

La estructura muestra en general el mallado que se superpone a la estructura en cuestión, los ejes en 3D dan a conocer la ubicación en el espacio. La Figura 54 muestra el esfuerzo de Von

Mises para valores mínimos y máximos del estado de esfuerzos en una escala de 1:1 expresada mediante criterio del diseñador para un mejor análisis de los resultados obtenidos.

Los valores mínimos de tensiones se ubican en la parte inferior de la cabeza de perforación dando un comportamiento positivo en el diseño establecido por el Autor. Por otra parte, en la base de la estructura de la plataforma se encuentran los valores máximos de tensiones, resultado de la iteración de las fuerzas superiores soportadas por el sólido (Ver Figura 54)

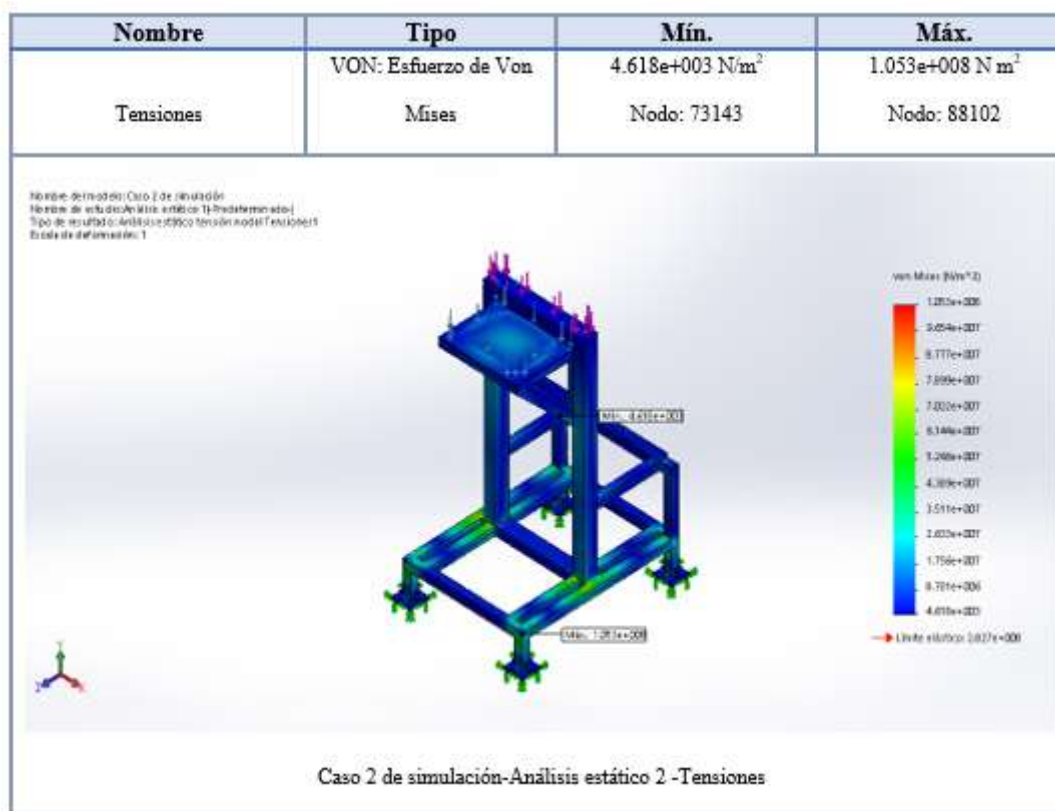


Figura 54. Tensión Von Mises, Caso 2

Fuente: Autor del Proyecto

En esta clase de estructuras se este tipo de deformación se conoce como pandeo, siendo este un factor importante de diseño.

Bajo las condiciones de simulación el Software arrojó un modelo que soporta dos fuerzas, la primera aplicada en el bastidor y la segunda en la cabeza de perforación. (ver *Figura 58*). De igual manera con que se hizo el análisis estático, se caracterizó el estudio de pandeo, se aplicaron las limitaciones de movimiento de la estructura y las sujeciones respectivas.



Figura 58. Información del modelo, Análisis de Pandeo

Fuente: Autor del Proyecto

Como resultado y producto del estudio, el software arrojó dos situaciones en que la estructura experimenta deformaciones repetitivas asociadas a las fuerzas externas aplicadas; un desplazamiento de aquellos nodos más críticos en la estructura (*Figura 59*) y la deformación de

un modo concreto (Factor de carga crítico) perteneciente al modo trazado posible en la parte más crítica.

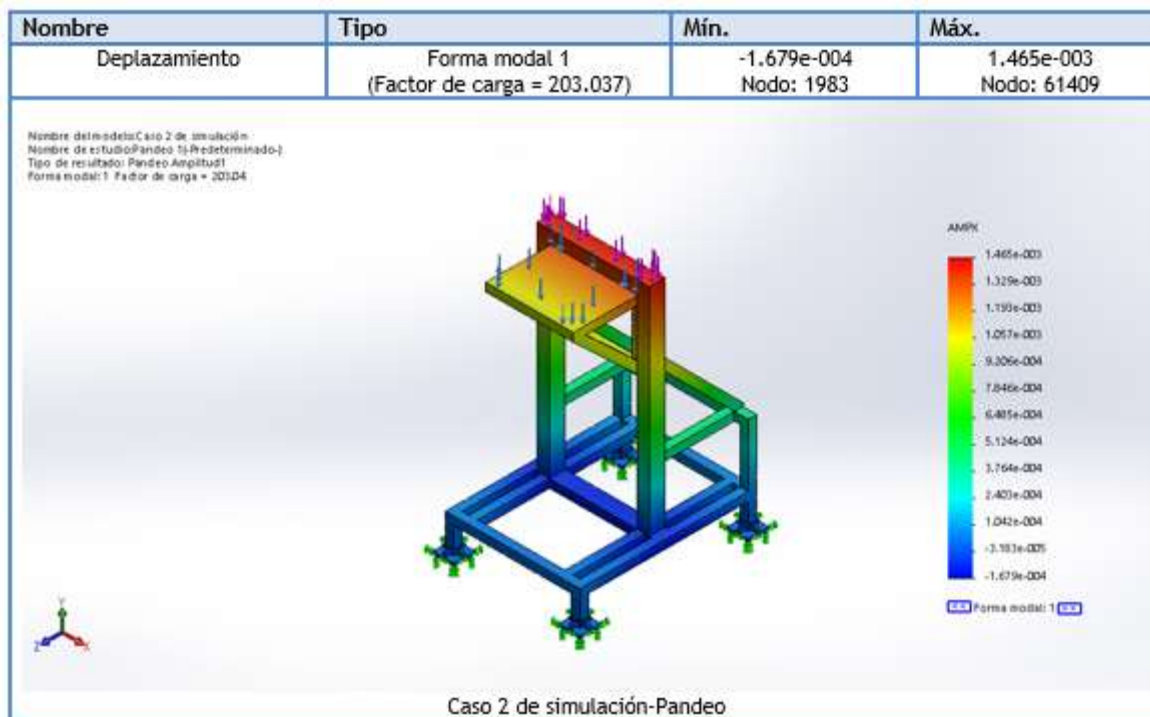


Figura 59. Desplazamiento en el Análisis de pandeo

Fuente: Autor del Proyecto

El primer desplazamiento en el pandeo lo registra el bastidor superior (zona roja) del riel dando un factor de carga de 203.037; este valor indica que la estructura no experimentaría pandeo para las condiciones de carga aplicadas en este estudio. Dado que los elementos soporte evitan el pandeo del bastidor, el factor de carga es elevado (Factores de carga >1 indican que no se produce pandeo). El análisis indica que en la estructura la condición de pandeo no es crítica; lo cual permite inferir que la mayor probabilidad de fallo en el bastidor podría ser por esfuerzo. Esto se evidencia en el análisis estático desarrollado en el primer estudio de simulación (en este estudio el factor de seguridad fue mayor a 1).

4.11.2.3 *Análisis de Frecuencias:* La estructura diseñada tiene una tendencia a vibrar; producto de aquellas frecuencias que generan los distintos elementos sobre ella. El diseño puede sufrir desplazamientos y tensiones debido a que este sea excitado por una carga con movimiento repetitivo que genere una frecuencia alterando la propia de la estructura; para ello se realizaron cuatro modos de amplitud sobre el diseño. Los datos que arrojó la simulación fueron:

Frecuencia n°.	Rad/seg	Hertz	Segundos
1	130.39	20.752	0.048188
2	136.32	21.696	0.046092
3	297.64	47.371	0.02111
4	446.88	71.124	0.01406

Participation de masa (Normalizada)

Modo n°.	Frecuencia(Hertz)	Dirección X	Dirección Y	Dirección Z
1	20.752	0.61333	2.5852e-008	2.7325e-008
2	21.696	5.6251e-008	0.17185	0.40473
3	47.371	0.0049159	1.2186e-009	3.6749e-011
4	71.124	0.21401	2.1581e-007	2.7697e-007
		Sum X = 0.83225	Sum Y = 0.17185	Sum Z = 0.40473

Figura 60. Resultados de análisis de frecuencias

Fuente: Autor del Proyecto

Se evidencia en la *Figura 60* los datos que arrojó el software en la simulación. El primer modo de frecuencia arrojó que la estructura toma una resonancia cuando se supera los 20.752 *Hertz* a una velocidad de $130.39 \frac{Rad}{seg}$; cada modo calculado presentó dirección en masa propia de la estructura. Los valores (*Figura 60*) superan el 80% de la masa lo que predice el participe en las diferentes direcciones.

La *Figura 61* arroja el valor mínimo de frecuencia en que la estructura puede empezar a tomar resonancia de otros equipos propios del sistema, las zonas rojas indican que el bastidor es la primera parte expuesta a sufrir vibraciones.

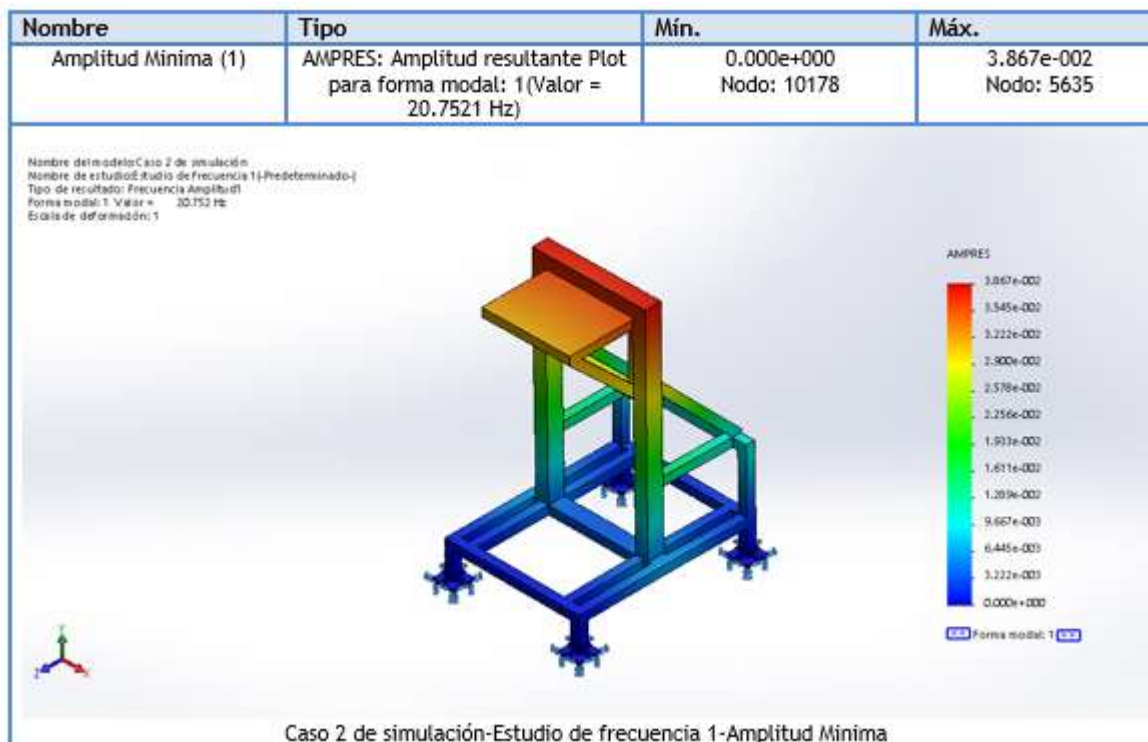


Figura 61. Amplitud 1, modo 1, estudio de Frecuencias

Fuente: Autor del Proyecto

La amplitud 4 del modo pertinente (*Figura 62*) permite demostrar que en este instante los elementos de la estructura que toman problemas de vibraciones están ubicado hacia la parte posterior del diseño (elementos 60x60 mencionado en secciones anteriores); un valor de $446.88 \frac{Rad}{seg}$ indica que esta zona está propicia a experimentar resonancia ajena a la del equipo; con una frecuencia de 71.124 Hertz arrojada por la simulación (*Figura 60*), aquellos sistemas

que igualen este valor reactivan resonancia con la estructura ya que permanecerán en un valor igual.

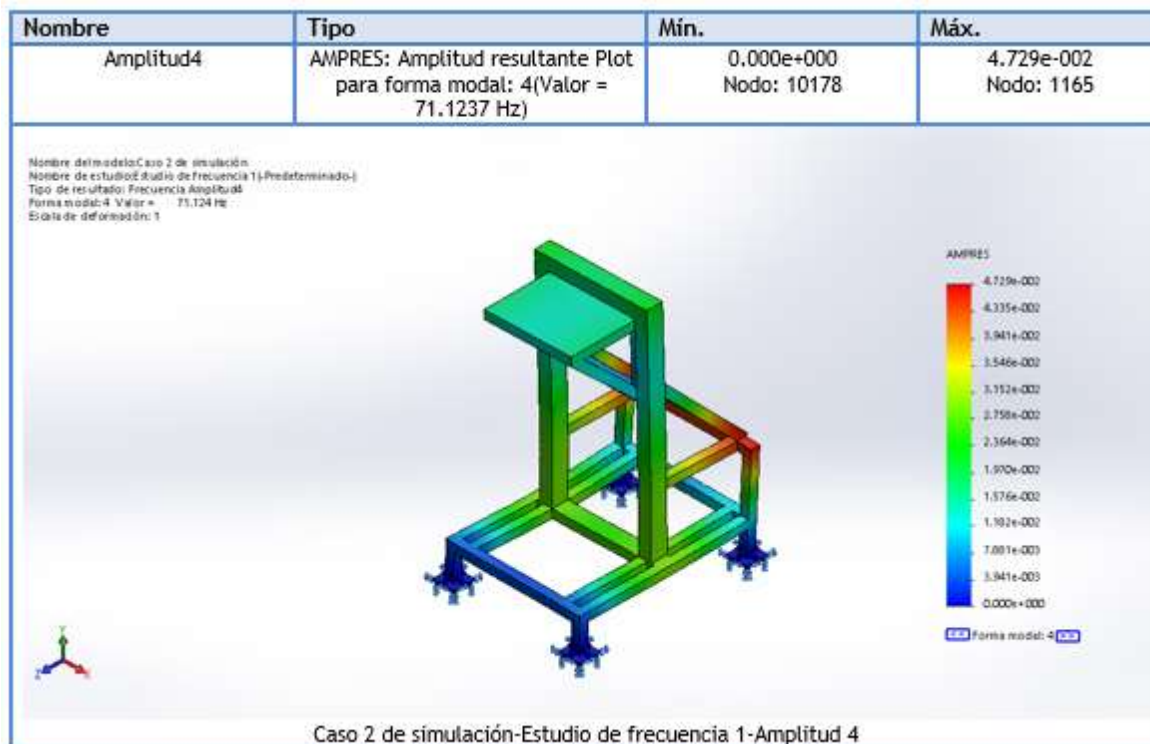


Figura 62. Amplitud 4, modo 4, Estudio de Frecuencias

Fuente: Autor del Proyecto

Finalmente, la simulación permite establecer qué tan factible y positivo es el diseño de la plataforma de perforación Hidráulica llevada a las características de suelo en la provincia de Ocaña (Norte de Santander) ante el ensamble de todos los elementos que la componen; como el motor de rotación, el motor de elevación; la cadena de transmisión de Potencia, la bomba de lodos, etc. Al igual que respuesta del suelo ante la resistencia que este opone al ser perforado. Son factores que emiten vibraciones a la estructura dando probables fallos a corto, mediano y

largo plazo; el criterio del diseñador es de fundamental base para la creación de prototipos con su eficiente funcionamiento.

Conclusiones

A partir de la información reportada en distintas fuentes de información, se logró desarrollar una correcta recopilación de las características del tipo de suelos en la región del municipio de Ocaña que permitieron analizar las propiedades del tipo de roca como parámetro inicial de diseño en la perforación de suelos, las cuales a su vez sirvieron para clasificar la formación rocosa como tipo “blanda”.

La clasificación de las diversas tecnologías para la perforación de pozos en la extracción de agua subterránea sirvió como fundamento teórico para la selección y estudio de los parámetros de diseño, dimensiones, materiales y elementos auxiliares de las perforadoras de pozos propuesta. Dada la aplicabilidad de este equipo y con base en las condiciones de la región de estudio, se formuló un diseño adecuado en el transporte y funcionalidad de aquellos elementos necesarios para que la plataforma de perforación Hidráulica realice su trabajo de campo de manera adecuada.

Los resultados de la simulación indican que las suposiciones y estimaciones realizadas de forma analítica sobre la plataforma de perforación son adecuadas con base en un análisis de esfuerzos y deformaciones de la estructura del equipo. Los factores de seguridad y las deformaciones máximas obtenidas indican un funcionamiento adecuado del dispositivo para las condiciones máximas de carga encontradas.

El proyecto plasmó el diseño de una plataforma de perforación que extrae aguas subterráneas a una profundidad máxima de 85 m con un diámetro estándar de 4 pulgadas en

suelos blandos con una resistencia a la compresión de 45.69 MPa (característica del subsuelo de una parte de la provincia de Ocaña). Este mecanismo de perforación surge de un boceto inicial enfocado a fácil manejo y transporte. El dispositivo cuenta con sistemas de funcionamiento estándar, lo que permitiría su construcción física.

Se concluye de forma general que los resultados obtenidos mediante la simulación en el software de diseño, en relación a deformaciones, desplazamientos y valores de Factores de seguridad fueron adecuados debido a la discretización (mallado de pieza) de la estructura en cuestión; creando así mismo, elementos finitos en función de una pieza original (plataforma de perforación).

Recomendaciones

El Diseño y la simulación de la plataforma hidráulica de perforación establece una serie de recomendaciones dadas por el Autor del proyecto para que sea seguro y apto su posible funcionamiento y accionamiento en el campo de acción, Estas sugerencias son:

Aunque el diseño apunta a un fácil montaje y funcionamiento sencillo en la extracción de aguas subterráneas es necesario montar la estructura en remolque de único eje anclado a un vehículo que permita la ubicación de la plataforma en aquellos lugares de difícil acceso en la provincia de Ocaña y sus alrededores.

Se recomienda que la perforación del pozo se haga lejos de puntos de contaminación, zonas de basuras u otro agente relacionados; ya que las aguas subterráneas se verán alteradas por sustancias no aptas para su uso.

La estructuración del diseño descrito en el capítulo 4 sirve como fundamento teórico para la formulación y mejora de otros dispositivos de perforación. No obstante, se recomienda consultar esta información sólo como una guía básica general en relación a los aspectos de diseño de perforadoras.

Incluir en el diseño en análisis de un mecanismo que permita la sujeción y desmontaje de la barrena de perforación en la sarta del mecanismo que ayude a la extracción de la tubería interna en el pozo; mejorando el trabajo del sistema estructural.

Referencias

- Alcaldía de Ocaña. (2019). Plan de desarrollo del Municipio de Ocaña. *Alcaldía de Ocaña, 1*, 1–301.
https://ocananortedesantander.micolombiadigital.gov.co/sites/ocananortedesantander/content/files/000108/5376_plandedesarrolloeslahoradeocaa20162019.pdf
- Amaya, R. J. G., Barbosa, T. E. G., & Torrado, A. A. M. (2013). Investigación geotécnica para la estabilización de las laderas del barrio San Fermín, municipio de Ocaña, departamento de Norte de Santander (Colombia). *Inge Cuc, 9*(2), 66–74.
- Ambiente, M. De, & Territorial, D. (2009). *Red nacional de aguas subterráneas*. 1–46.
- Arcila, A. (2018a). *¿Dónde está el petróleo en Colombia?* Las2Orillas.
https://images.clarin.com/2019/10/29/el-pozo-esta-bien-al___goDtO4-N_720x0__1.jpg
- Arcila, A. (2018b). *No TitleMeta y Casanare, con el 70% del petróleo en Colombia*. Las Chivas Del Llano. <https://laschivasdelllano.com/meta-y-casanare-con-el-70-del-petroleo-en-colombia/>
- Ardila, J. andrés I., & Rodríguez, C. A. S. (2015). *Diseño de sistemas de pozos para la captación de agua subterránea: caso de estudio la Mojana* (Vol. 0, Issue 0). Universidad Católica de Colombia.
- Autores del Schlumberger Oilfield. (2020). Vástago de Perforación. *Oilfield Glossary En Español, 0*(0), 1–2.
- Azcona, J. pedro. (2019). *Perforación y terminación de pozos petroleros*. Monografias.Com.

<https://www.monografias.com/trabajos11/pope/pope.shtml>

Bernaola, J. (2014). Perforación y Voladura de Roca en Minería. *Journal of Investment Management*, 264.

Bourgoyne, A. T. (1986). *Applied Drilling Engineering*. Society of Petroleum Engineers.

Budynas, R. G., & Nisbett, J. K. (2012). *Diseño en ingeniería mecánica de Shigley* (9th ed.). MCGRAW-HILL/INTERAMERICANA EDITORES, S.A. DE C.V.

Camilo Sanchez Ortega. (2018). *Plan director de agua y saneamiento Basico. 1*, 1–108.

Castellanos Garcia D. (2008). *Conpes* 2537. 1, 87.
http://cenired.org.co/images/PDF/CONPES_3527_230608.pdf

Corredor, N. E. C., & Bayona, R. A. S. (2017). Diseño y Construcción de una unidad móvil de perforación para pozos profundos de agua potable para la empresa perforaciones montajes equipos y suministros S.A.S. In *Universidad Industrial de Santander* (Vol. 0, Issue 0). Universidad Industrial de Santander.

DAG Ingeniería S.A.S. (2014). INFORME DIAGNÓSTICO - MUNICIPIO DE OCAÑA. *Secretaria de Agua Potable y Saneamiento Básico, 01*, 1–163.

David Jaramillo Martinez. (2016). *Análisis de fatiga mediante el método de elementos finitos*. Universidad del país vasco.

Dienagha, A. R. S., Ikenyiri, G. C., Owei, S. O., & Harcourt, P. (2013). Design of A Portable Hydraulic Water Borehole Drilling Rig. *Innovative Systems Design and Engineering*, 4(14), 1–10.

diener precision pumps. (2021). *BOMBAS DE DESPLAZAMIENTO POSITIVO*. Dienerprecisionpumps. <https://www.dienerprecisionpumps.com/es/bombas-de-desplazamiento-positivo.html>

Direct industry. (2021). *Direct industry- product Sunbo Pumb*. <https://www.directindustry.es/prod/shijiazhuang-sunbo-pump-co-ltd/product-161680-2292681.html>

directindustry. (2021a). *Motor Hidráulico*. Liebherr SAS. <https://www.directindustry.es/prod/liebherr-machines-bulle-sa/product-214371-2283450.html>

directindustry. (2021b). *Motor hidráulico de engranaje CE series*. Hydraulica De Colombia. Hydraulica De Colombia

El Clarin. (2019). *SG-3, el pozo que llegó a las puertas del infierno - Clarín*. Clarin.Com. https://www.clarin.com/viajes/sg-3-pozo-llego-puertas-infierno_0_h6qpNaMt.html

El Tiempo. (2018). *Se cumplen cien años de explotación petrolera en Colombia - Otras Ciudades - Colombia -*. Periódico El Tiempo. <https://www.eltiempo.com/colombia/otras-ciudades/se-cumplen-cien-anos-de-explotacion-petrolera-en-colombia-211316>

Enrique, O. (2013). *FORTALECIMIENTO DE POZOS DURANTE LA PERFORACIÓN “STRESS CAGE.”*

Fearnley Procter Group. (2018). *Fearnley Procter Group - NS-1™ Standard*. NS-1™ Standard. <https://www.fearnleyprocter.com/ns-1-standard>

Fernández, S. I. B. (2017). *Diseño de una Máquina Hidráulica Perforadora de Pozos para la*

Obtención de Agua desde Napas Subterráneas. UNIVERSIDAD DEL BIO-BIO.

Gabinete Municipal, & Yañez, jairo tomás. (n.d.). Plan de desarrollo Municipal, Cúcuta 2050.

Plan de Desarrollo, 1, 2–47.

Geoproductos.es. (2020). *Que es una barrena.* Geo. <https://geoproductos.es/wp-content/uploads/2014/01/que-es-una-barrena.jpg>

Gimeno, C. L. (2006). *Manual De Sondeos. Tecnologia De Perforacion* (Omega S.A (ed.); Universida).

Guevara, S. E., Agudelo, W. M., Rueda, D., García, N., Becerra, C., Figueredo, Y., & Plata, A. (2010). Seismic and lithological near surface characteristics of an area in north-east Colombia. *CTyF - Ciencia, Tecnologia y Futuro*, 4(1), 7–21.

hidrogeologiaypozos.blogspot. (2017). *Hidrogeología y pozos.* Blogspot. <http://hidrogeologiaypozos.blogspot.com/2017/11/>

Hossain, M. E., & Abdulaziz Abdullah. (2015). Drilling Methods. In *Fundamentals of Sustainable Drilling Engineering* (pp. 17–72). John Wiley & Sons, Ltd. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/9781119100300.ch2>

Icontec. (2016). Norma colombiana (NTC5539). In *Pozos profundos de agua.* <https://www.docsity.com/es/norma-colombiana-ntc5539/4150681/>

ICRC. (2010). Technical Review Borehole Drilling and Rehabilitation Under Field Conditions. In *Comite Internaional Crus Roja* (Vol. 1, Issue 2). https://www.icrc.org/eng/assets/files/other/icrc_002_0998.pdf

- Ingecad. (2020). *Malacate Manual*. Habitissimo - Remodelaciones y Servicios Para El Hogar.
https://fotos.habitissimo.com.co/foto/malacate-manual_54924
- ITERMEC. (2021). *Oriental Chain MFG.co.LTD*.
https://www.ocm.co.jp/en/ct_products/standard-chain/
- Jiménez, Á. J. U., & Mestra, J. L. (2017). *Diseño de un Equipo Portátil de Perforación de Suelos Humíferos y Mixtos de hasta 100 metros de Profundidad*.
- Juarez, P. R. (2019). *Diseño De Sarta De Perforacion*. Universidad Nacional Autónoma de Mexico.
- Liu, J., & Ran, L. (2014). The development of deep borehole permanent-magnet motor direct drive top-driving drilling rig. *Procedia Engineering*, 73(May), 1–7.
<https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.06.182>
- Lizarazo, S. A. P. (2015). Guía Básica de construcción de pozos profundos en Colombia. *Universidad Libre de Colombia*, 0(0), 1–40.
- Llera, J. M. P., Gimeno, C. L., Urbina, F. P. O. de, & Gimeno, E. L. (2003). *Manual de perforación y voladura de rocas* (IGME (ed.)).
- Luo, J., Li, L. G., Yi, W., & Li, X. (2014). Working performance analysis and optimization design of rotary drilling rig under on hard formation conditions. *Procedia Engineering*, 73(May), 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.06.165>
- Málaga, C. G. P. (2013). *Diseño y simulación de perforadora hidráulica para pozos de agua*.
<https://hdl.handle.net/11042/1765>

- Mao, L., Zeng, S., Liu, Q., Wang, G., & He, Y. (2020). Dynamical mechanics behavior and safety analysis of deep water riser considering the normal drilling condition and hang-off condition. *Ocean Engineering*, *199*(January), 1–19. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2020.106996>
- Martínez., J. N. D. S. (2016). Reducción de revoluciones de un motor. *Slidershareshare*, *0*(0), 1–33. <https://es.slideshare.net/De97nata/reduccion-de-revoluciones-de-un-motor>
- Mavares, F. J., & Pertuz, A. D. (2013). Diseño de un sistema cementante para pozos utilizados en anclaje de plataformas de producción en aguas profundas, Caso: Rio de Janeiro, Brasil. *Revista de La Facultad de Ingenieria*, *28*(1), 1–19.
- Ministerio de Minas. (2020). Decreto Número 328 del 28 de febrero de 2020. *Presidencia de La República*, *328*(2–19), 1689–1699.
- Mosquera, G. P. C., & Haro, E. P. N. (2018). Diseño de una torre de perforación de pozos de agua. *Escuela Politécnica Nacional*, *0*(0), 1–199.
- Mott, R. L., Vavrek, E. M., & Wang, J. (2018). *MACHINE ELEMENTS IN MECHANICAL DESIGN* (P. Education (ed.); 6th ed.). Pearson Education.
- Muñoz, J. E. A., & Ballesteros, A. (2013). *ESTUDIO GEOTECNICO DEFINITIVO LOTE CIUDADELA DEPORTIVA*. Universidad Francisco de Paula Santander - Ocaña.
- Pezo, R. E. C. (2019). *Aplicación de la fórmula de R. Praillet para evaluar la velocidad de penetración y su impacto en la perforación primaria en una mina a tajo abierto de Ica - Perú 2018*.
- Pineda, J. (2019). *Tipos de Suelos, Clasificación de los Suelos, Organización del Suelo*. Encolombia.Com. <https://encolombia.com/economia/agroindustria/agronomia/tipos-de->

suelos/

Ramirez, M., Nacarino, M., Sanchez, R., & Correa, T. (2013). Métodos de perforación. *Escuela Académico Profesional Ingeniería Geológica*, 4(0), 1–49.

Rezaee, A. (2017). Design, Construction and Evaluation of a Digital Hand-Pushed Penetrometer. *International Journal of Advanced Smart Sensor Network Systems*, 7(1), 1–10.
<https://doi.org/10.5121/ijassn.2017.7101>

Sepúlveda, J. E. R. (2019). *El recurso agua en Colombia | Agricultura & Ganadería*. Agricultura y Ganadería. <https://www.agriculturayganaderia.com/website/el-recurso-agua-en-colombia/>

SGC, soluciones globales C. L. (2020). *Perforación y mantenimiento de pozos de agua en Colombia | SGC*. Pozos de Aguas GC. <http://pozosdeaguasgc.com/>

Suaña, H. F. L. (2016). Estudio y análisis de una perforadora Hidráulica para pozos de agua en la región de puno. *Universidad Nacional Del Altiplano-Puno*, 0(0), 1–159.

Telecinco. (2020). *Telecinco*. Pozo Superprofundo de Kola. https://www.telecinco.es/informativos/salud/ultima-hora-coronavirus_18_2951820011.html

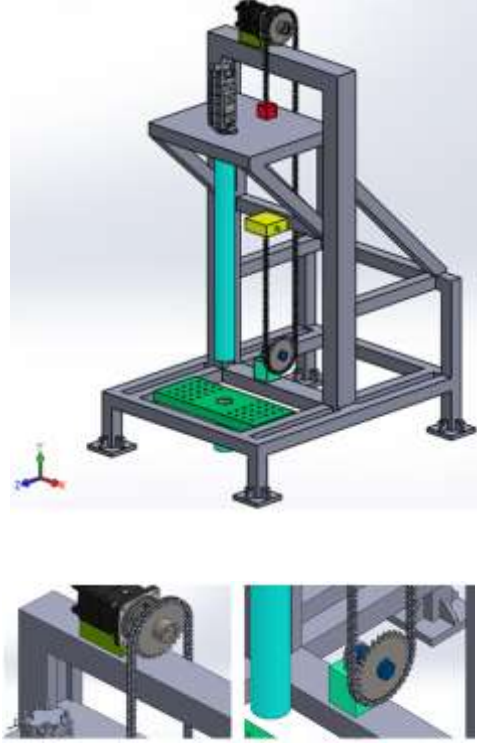
Teresa transmisiones. (2017). *Características reductores de velocidad*. Ciertas Características de Los Reductores de Velocidad. <https://tercesa.com/noticias/caracteristicas-reductores-de-velocidad/>

Tian, D., Fan, H., Leira, B. J., & Sævik, S. (2020). Study on the static behavior of installing a deep-water drilling riser on a production platform. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 185(0), 1–10.

- Universidad De Medellin, Antioquia, U. de, Universidad pontificia Bolivariana, & Medellín, A. de. (2011). Lineamientos Para Exploración Y Perforación, Realización De Pruebas De Bombeo Y Mantenimiento Y Limpieza De Captaciones De Aguas Subterráneas. *RedRío Aburrá-Medellin*, 0(0), 1–36.
http://www.metropol.gov.co/recursohidrico/Documents/LINEAMIENTOS_AGUAS_SUBTERRANEAS.pdf
- Vázquez, A. A. C. (2019). Propuesta de diseño de Barrena en CAD para selección en perforación de pozos en aguas profundas. *Instituto Politécnico Nacional, Mexico*, 0(0), 1–99.
- Víctor, Y. P. (2019). Principios de las perforaciones. *Universitat Politècnica de València*, 1.
<https://victoryepes.blogs.upv.es/2019/01/29/principios-de-las-perforaciones-a-rotacion/>
- Wilson Buch. (2017). *Historia Y Origen De Los Dulces*. Aquasistemas.
<https://aquasistemas.com.gt/bombas-de-agua/historia-y-origen-de-los-pozos-de-agua>
- Worth, M. (1998). *A mechanism for percussion drilling of low cost water wells in developing countries*. Cranfield University.
- Xataka. (2020). *El fascinante mundo de las plataformas petrolíferas: estructuras flotantes de 200.000 toneladas o 2.900 metros de profundidad*. Xataka.
<https://www.xataka.com/otros/fascinante-mundo-plataformas-petroliferas-estructuras-flotantes-200-000-toneladas-2-900-metros-profundidad>

Apéndices

Apéndice A. Ficha Técnica de la plataforma hidráulica de perforación para pozos de agua

	Ficha Técnica	
Autor: Mauricio Pérez Vacca		
	Especificaciones técnicas	
	Profundidad Máxima del diseño	85 m
	Diámetro de perforación	101.6 mm
	Motor superior	2 Hp
	Motor inferior	11 Hp
	Potencia a transmitir	Motor a gasolina de 13 Hp comercial en el mercado
	Fuerza de empuje	46700 N
	Suelos a perforar	suelo con rocas blandas
	Material de construcción	Acero 1030 laminado en caliente
	Torque Máximo de elevación	2802 N.m
Peso estructural total	205 Kg aproximadamente	
Dimensiones		
Ancho: 1.3 m	Largo: 1.7 m	Alto: 2.5 m
Descripción de la máquina		
<p>La estructura consta de dos motores hidráulicos; uno de elevación y el otro encargado de la perforación. La plataforma consta de dos elementos importantes; la base móvil de perforación y la estructura base de la plataforma, el funcionamiento es sencillo ya que un motor de combustión de 13 Hp hace girar los elementos del sistema que realizan trabajo mecánico; la cadena se convierte en un importante elemento en el diseño ya que esta es la que soporta la potencia transmitida por el motor de elevación y el peso producido por toda la sarta de perforación junto con el lodo y arena de pozo a intervenir. se espera que el trabajo de perforación se realice en terrenos con las características dadas por el suelo de la provincia de Ocaña (Norte de Santander)</p>		