

DISEÑO DE UNA HERRAMIENTA DIGITAL QUE PERMITA LA ESTIMACIÓN DE LA VELOCIDAD ÓPTIMA Y EL ÁNGULO DE BAJADA DEL EQUIPO BES PARA SU CORRECTA INSTALACIÓN EN FONDO, MINIMIZANDO EL DAÑO MECÁNICO DEL CABLE DE POTENCIA.

CAMILA ANDREA RUBIO CABALLERO
CARLOS FABIÁN SÁNCHEZ SUÁREZ

FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA
FACULTAD DE INGENIERÍAS
PROGRAMA DE INGENIERÍA DE PETRÓLEOS
BOGOTÁ, D.C
2019

DISEÑO DE UNA HERRAMIENTA DIGITAL QUE PERMITA LA ESTIMACIÓN DE LA VELOCIDAD ÓPTIMA Y EL ÁNGULO DE BAJADA DEL EQUIPO BES PARA SU CORRECTA INSTALACIÓN EN FONDO, MINIMIZANDO EL DAÑO MECÁNICO DEL CABLE DE POTENCIA.

CAMILA ANDREA RUBIO CABALLERO
CARLOS FABIÁN SÁNCHEZ SUÁREZ

Proyecto integral de grado para optar el título de:
INGENIERO DE PETRÓLEOS

Director:
CAMILO GONZALEZ ARTUNDUAGA
Ingeniero Mecánico

FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA
FACULTAD DE INGENIERÍAS
PROGRAMA DE INGENIERÍA DE PETRÓLEOS
BOGOTÁ, D.C
2019

NOTAS DE ACPETACIÓN

Ing. Laydy Paola

Ing. Diego Araque

DIRECTIVAS DE LA UNIVERSIDAD

Presidente de la Universidad y Rector del Claustro:

Dr. MARIO POSADA GARCIA-PEÑA

Vicerrector de Desarrollo y Recursos Humanos:

Dr. LUIS JAIME POSADA GARCIA-PEÑA

Vicerrectora Académica y de Posgrados:

Dra. ANA JOSEFA HERRERA VARGAS

Decano Facultad de Ingeniería:

Dr. JULIO CESAR FUENTES ARISMENDI

Director Programa de Ingeniería de Petróleos

Ing. JUAN CARLOS RODRIGUEZ ESPARZA.

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

DEDICATORIA

Gracias a Dios por haber puesto en mi camino tantas oportunidades, por guiarme en cada paso, por poner a personas tan importantes en mi vida y por permitirme terminar esta carrera.

Gracias a mi familia, en especial a mis padres que siempre han estado apoyándome en todo sentido y en cada proyecto, este título es posible gracias a ellos y a su esfuerzo.

A mi compañero y amigo de tesis, gracias a su esfuerzo, dedicación y conocimiento logramos culminar este proyecto, siempre con respeto y buen trato, llevándonos al inicio de una amistad

Fue un gusto trabajar junto a él.

CAMILA ANDREA RUBIO CABALLERO

DEDICATORIA

En primer lugar, quiero agradecer a Dios por permitirme tener la oportunidad de entregar este trabajo de tesis.

A mis padres y mi hermana muchas gracias por el apoyo moral incondicional, en especial a mi madre, quien siempre estuvo ahí para brindarme fortaleza en los momentos de mayor dificultad. También, quiero agradecer a mis amigos por acompañarme a lo largo del desarrollo del proyecto y por estar siempre dispuestos a brindarme su apoyo y compañía en todo momento.

A la coautora del proyecto, Camila Andrea Rubio, porque juntos logramos sacar adelante este trabajo de grado y mejorar las expectativas propuestas en los objetivos. Porque fue un gusto muy grande trabajar con ella esta tesis y una experiencia bastante agradable, con una gran persona y colega.

“Porque el éxito nunca llega solo, y siempre habrá un momento para sonreír”

CARLOS FABIÁN SÁNCHEZ SUÁREZ

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a los docentes que hicieron parte de nuestro desarrollo y formación como ingenieros de petróleos, tanto en lo académico, como en lo personal. Y a todos aquellos compañeros, amigos y colegas que la vida puso en nuestro camino para estar presentes a lo largo del pregrado.

Agradecimiento especial a nuestro director Camilo González, quien nos suministró los datos necesarios para el desarrollo del proyecto y estuvo atento cuando requerimos de su asistencia en conocimientos.

A la empresa Baker Hughes, a GE Company, por habernos aceptado ser sus tesistas y por depositar en nosotros la confianza necesaria para el desarrollo del proyecto, así como el soporte de información y de las instalaciones de la empresa.

CONTENIDO

	pág.
INTRODUCCIÓN	22
1. MARCO TEÓRICO	25
1.1 GENERALIDADES DEL EQUIPO BES	26
1.2 DESCRIPCIÓN DEL CABLE ELÉCTRICO DE POTENCIA	27
1.3 INSTALACIÓN DEL EQUIPO BES	27
1.3.1 Verificación del diámetro de la herramienta	27
1.3.2 Nivel de fluido y zonas con desviación	27
1.3.3 Factores mecánicos	28
1.3.4 Geometría del pozo	28
1.3.5 Geometría del pozo durante la instalación	28
1.3.6 Excesiva velocidad de bajada del equipo BES	29
1.3.7 Cable de potencia golpeado durante la bajada del equipo BES con las cuñas del taladro/mesa rotaria	30
1.4 FALLAS DEL CABLE DE POTENCIA	30
1.5 DESCRIPCIÓN DEL LENGUAJE DE PROGRAMACIÓN	31
2. METODOLOGÍA Y DATOS	32
2.1 DATOS	32
2.2 METODOLOGÍA	32
2.2.1 Herramienta digital (ANGVEL)	32
2.2.1.1 Hoja Welcome	33
2.2.1.2 Hoja Instructions	33
2.2.1.3 Hoja Calculations	33
2.2.1.4 Hoja Angle	39
2.2.1.5 Hoja Velocity	40
2.2.1.6 Hoja Trajectory	40
2.2.1.7 Hoja Plan View	40
2.2.1.8 Hoja Inclination	40
2.2.1.9 Hoja Azimuth	41
2.2.1.10 Hoja DLS	41
2.2.2 Análisis Estadístico	41
2.2.3 Validación	42
2.2.4 Análisis Financiero	43
3. RESULTADOS	45
3.1 ANÁLISIS ESTADÍSTICO	45
3.1.1 Inclinação	46
3.1.2 Cambio de Azimut	46
3.1.3 DLS	47
3.1.4 Inclinação teniendo en cuenta el cambio de azimut	48
3.1.4.1 Cuando se presentaron fallas	49
3.1.4.2 Cuando no se presentaron fallas	50

3.2	VALIDACIÓN	51
3.2.1	Pozo con falla	51
3.2.2	Pozo sin falla	55
3.3	ESTUDIO FINANCIERO	58
3.3.1	Ingresos	58
3.3.2	Egresos	59
3.3.3	Valor presente neto para equipos con fallas en el cable de potencia	60
3.3.4	Valor presente neto para equipos sin fallas en el cable de potencia	60
3.3.5	Proyección del valor presente neto	61
4.	ANÁLISIS DE RESULTADOS	62
4.1	ANÁLISIS ESTADÍSTICO	62
4.1.1	Análisis de Inclinación	62
4.1.2	Análisis del cambio de Azimut	62
4.1.3	Análisis del DLS	62
4.1.4	Análisis de Inclinación y cambio de azimut	62
4.2	VALIDACIÓN	64
4.2.1	Pozo con falla	64
4.2.2	Pozo sin falla	67
4.3	ANÁLISIS FINANCIERO	69
4.3.1	Análisis financiero de equipos con fallas	69
4.3.2	Análisis financiero de equipos sin fallas	69
4.3.3	Proyección a tres años	70
5.	CONCLUSIONES	71
6.	RECOMENDACIONES	72
	BIBLIOGRAFÍA	74
	ANEXOS	75

LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 1. Componentes de subsuelo del equipo BES	25
Figura 2. Partes y protección del cable de potencia	27
Figura 3. Inclinación y ángulos de azimut	29
Figura 4. Diagrama de flujo del funcionamiento general de ANGVEL	33
Figura 5. Diagrama de flujo hoja Calculations	34
Figura 6. Diagrama esquemático de un pozo considerando el método de mínima curvatura	35
Figura 7. Delta de Azimut	38
Figura 8. Diagrama de flujo hoja Angle	39
Figura 9. Diagrama de las posibles ubicaciones del cable de potencia	39
Figura 10. Diagrama de flujo hoja Velocity	40
Figura 11. Representación gráfica de la flexión de la herramienta	43
Figura 12. Resultados de fuerzas laterales vs profundidad pozo con falla	52
Figura 13. Resultados de esfuerzos vs profundidad pozo con falla	52
Figura 14. Datos de Autograph Pozo con Falla Caso 1	53
Figura 15. Resultados de Autograph pozo con falla caso 1	53
Figura 16. Datos de Autograph Pozo con Falla Caso 2	54
Figura 17. Resultados de Autograph Pozo con Falla Caso 2	55
Figura 18. Resultados de Fuerzas Laterales vs Profundidad Pozo sin Falla	56
Figura 19. Resultados de esfuerzos vs profundidad pozo sin falla	56
Figura 20. Datos de Autograph Pozo Sin Falla Caso 1	56
Figura 21. Resultados de Autograph pozo sin falla caso 1	57
Figura 22. Datos de Autograph Pozo Sin Falla Caso 2	57
Figura 23. Resultados de Autograph Pozo Sin Falla Caso 2	58
Figura 24. Recomendación de la velocidad de bajada, según DLS	64
Figura 25. Recomendación de velocidad pozo con falla en el cable de potencia	66
Figura 26. Recomendación de velocidad pozo sin falla en el cable de potencia	68
Figura 27. Diagrama del flujo de caja	69
Figura 28. Diagrama flujo de caja equipos sin fallas	69
Figura 29. Diagrama de flujo de proyección	70

LISTA DE GRÁFICAS

	pág.
Gráfica 1. Clasificación de fallas del cable de potencia	45
Gráfica 2. Análisis de Inclinación	46
Gráfica 3. Análisis de cambio de azimut	47
Gráfica 4. Análisis de DLS	47
Gráfica 5. Análisis de inclinación según cambio de azimut	48
Gráfica 6. Frecuencias de los rangos de velocidades para cada valor de DLS	50
Gráfica 7. Frecuencias de los rangos de velocidades para cada valor de DLS	51
Gráfica 8. DLS vs Profundidad medida para el pozo con falla	65
Gráfica 9. DLS vs MD para el pozo sin falla	67

LISTA DE ECUACIONES

	pág.
Ecuación 1. Cálculo del Ratio Factor	35
Ecuación 2. Cálculo de Norte	35
Ecuación 3. Cálculo del Este	36
Ecuación 4. Cálculo del TVD	36
Ecuación 5. Cálculo del DL	36
Ecuación 6. Cálculo del Course Length	36
Ecuación 7. Cálculo del DLS	36
Ecuación 8. Cálculo de Closure Distance	37
Ecuación 9. Cálculo de Closure Angle	37
Ecuación 10. Cálculo de Directional Difference	37
Ecuación 11. Cálculo de Vertical Section	37
Ecuación 12. Cálculo de A	38
Ecuación 13. Cálculo de B	38
Ecuación 14. Bending Moment	42
Ecuación 15. Bending Stress	42
Ecuación 16. Cálculo Bending Stress	43
Ecuación 17. Cálculo del VPN	43

LISTA DE TABLAS

	pág.
Tabla 1. Frecuencias de los rangos de velocidades para cada valor de DLS	49
Tabla 2. Frecuencias de los rangos de velocidades para cada valor de DLS	50
Tabla 3. Ingresos totales en 3 años para un campo	58
Tabla 4. Ingresos anuales	59
Tabla 5. Egresos por garantía	59
Tabla 6. Gastos de comercialización y administrativos	59
Tabla 7. Flujo de caja para pozos con fallas en el cable de potencia	60
Tabla 8. Flujo de caja para pozos sin fallas en el cable de potencia	60
Tabla 9. Proyección de ventas a 3 años	61
Tabla 10. Flujo de efectivo proyectado	61
Tabla 11. Cálculo de fuerza pozo con falla caso 1	66
Tabla 12. Cálculo de fuerza pozo con falla caso 2	66
Tabla 13. Cálculo de fuerza pozo sin falla caso 1	68
Tabla 14. Cálculo de fuerza pozo sin falla caso 2	68

LISTA DE ANEXOS

	pág.
Anexo A. Recorte de pantalla de ANGVEL, hoja Welcome.	75
Anexo B. Recorte de pantalla de ANGVEL, hoja Instructions.	76
Anexo C. Recorte de pantalla de ANGVEL, hoja Calculations	77
Anexo D. Recorte de pantalla de ANGVEL, hoja Angle	78
Anexo E. Recorte de pantalla de ANGVEL, hoja Velocity	79
Anexo F. Recorte de pantalla de ANGVEL, hoja Trajectory	80
Anexo G. Recorte de pantalla de ANGVEL, hoja Plan view	81
Anexo H. Recorte de pantalla de ANGVEL, hoja Inclination	82
Anexo I. Recorte de pantalla de ANGVEL, hoja Azimuth	83
Anexo J. Recorte de pantalla de ANGVEL, hoja DLS	84

LISTA DE ABREVIATURAS

σ	Bending Stress / Tensión de flexión
°F	Grados Farenheit
Az / θ	Ángulo de Azimut
BES	Bombeo Electrosumergible
BHGE	Baker Hughes a GE Company
BPD	Barriles por Día
C	Deflexión de la herramienta
CA	Closure Angle / Ángulo de Cierre
CD	Closure Distance / Distancia de Cierre
CL	Course Length / Longitud de Tramo
CTRL	Comando Control
DD	Directional Difference / Diferencia Direccional
Defl	Delexión del equipo
DLS	Dog Leg Severity / Severidad Pata de Perro
ESP	Electrical Submersible Pump
F	Fuerza aplicada
Ft	Feet / Pies
GE	General Electric
I	Momento de inercia
In	Inches / Pulgadas
Incl / ϕ	Ángulo de Inclinación
J/h	Juntas por hora
Lbf	Libras fuerza
Long	Longitud del equipo
M	Bending Moment / Momento de Flexión
MD	Measured Depth / Profundidad Medida
PCF#_C#	Pozo con falla caso # _ Punto de contacto #

PSF#_C#	Pozo sin falla caso # _ Punto de contacto #
Psi	Pounds-force per square inch / libras fuerza por pulgada cuadrada
r	Longitud de la herramienta
Rad	Radianes
RF	Ratio Factor / Factor de Curvatura
SLA	Sistemas de Levantamiento Artificial
TVD	True Vertical Depth / Profundidad Vertical Verdadera
USD	United States Dollar / Dólar Estadounidense
UTM	Universal Transverse Mercator
VPN	Valor Presente Neto
VS	Vertical Section / Sección Vertical
VSA	Vertical Section Azimuth / Azimut de Sección Vertical

GLOSARIO

ÁNGULO DE AZIMUT: es el ángulo generado entre el norte geográfico y la proyección del pozo en un plano horizontal.

ÁNGULO DE CIERRE: es el ángulo utilizado para el cálculo de la distancia de cierre.

ÁNGULO DE INCLINACIÓN: es el ángulo generado entre la vertical y el pozo en un plano vertical.¹

ANGVEL: herramienta digital desarrollada en el presente trabajo de grado.

AUTOGRAPHPC: software de simulación y aplicación usado por Baker Hughes principalmente para el diseño de sistemas de levantamiento artificial.²

BENDING MOMENT: usado para cálculo del Bending Stress, es el producto de una fuerza por la distancia entre el punto de interés y la fuerza aplicada.

BENDING STRESS: es el esfuerzo generado en un punto específico de un cuerpo en el cual, una de las superficies sufre compresión y la otra sufre tensión.³

BOMBEO ELECTROSUMERGIBLE: sistema de levantamiento artificial que emplea bombas centrifugas y velocidad rotacional como principio de funcionamiento.⁴

DIFERENCIA DIRECCIONAL: representa el ángulo entre el cierre y la dirección del target propuesto.⁵

DISTANCIA DE CIERRE: es la distancia horizontal entre la mesa rotaria y el centro del objetivo o target.

DLS: curvatura del pozo entre dos estaciones de survey expresada en grados/ 100 ft o grados / 30 m.⁶

FACTOR DE CURVATURA: factor que permite el cálculo de los cambios en las coordenadas rectangulares en la trayectoria del pozo.⁷

¹ MITCHEL Robert, MISKA Stefan. Fundamentals of Drilling Engineering. Vol 12. Texas: SPE, 2011. 450 p

² BAKER HUGHES. Submersible Pump Handbook. 11 Ed. Claremore. Baker Hughes 2014. 186 p

³ McKeen, L. W. Introduction to Fatigue and Tribology of Plastics and Elastomers. 2010. 3p.

⁴ BAKER HUGHES. Op. Cit., 17 p

⁵ VELASQUEZ GOMEZ, Eduardo. CAMACHO, Eliodoro. Perforación Direccional. [en línea]. <https://issuu.com/ingenierocarlosmariocortez/docs/perfo_direccional>. 40 p

⁶ MITCHEL Robert, MISKA Stefan. Op. Cit., 451 p

⁷ Ibid., 469 p

FLUJO DE EFECTIVO: es la diferencia entre los ingresos periódicos y los egresos periódicos.⁸

LONGITUD DE CURSO: distancia real perforada desde un punto del agujero al próximo punto como medida. Se usa como una referencia de distancia entre cada junta de tubería.⁹

PROFUNDIDAD MEDIDA: es la distancia desde la mesa rotaria hasta cualquier punto a lo largo de la trayectoria del pozo

PROFUNDIDAD VERTICAL VERDADERA: es la distancia vertical desde la mesa rotaria hasta un punto del pozo.¹⁰

SECCIÓN VERTICAL: es el desplazamiento horizontal de la trayectoria del pozo proyectado 90° al rumbo del plan deseado.¹¹

SISTEMAS DE LEVANTAMIENTO ARTIFICIAL: sistemas que proporcionan energía o presión adicional al fluido para incrementar el flujo de hidrocarburos a la superficie¹²

SURVEY: datos de inclinación y azimut a diferentes puntos de profundidad medida o MD.

VALOR PRESENTE NETO: valor actual o presente de los flujos de efectivo netos de una propuesta.¹³

⁸ METE, Marcos. Valor Actual Neto y Tasa de Retorno: Su Utilidad como Herramientas para el Análisis y Evaluación de Proyectos de Inversión [en línea].

<http://www.scielo.org.bo/scielo.php?pid=S2071-081X2014000100006&script=sci_arttext>

⁹ VELASQUEZ GOMEZ, Eduardo. CAMACHO, Eliodoro. Op. Cit., 25 p

¹⁰ MITCHEL Robert, MISKA Stefan. Op. Cit., 450

¹¹ VELASQUEZ GOMEZ, Eduardo. CAMACHO, Eliodoro. Op. Cit., 26 p

¹² BAKER HUGHES. Op. Cit., 16 p

¹³ METE, Marcos. Op. Cit.

RESUMEN

Durante la instalación de los equipos de bombeo electrosumergible (BES) se presentan diferentes problemáticas al momento de posicionar la herramienta en fondo. Esto provoca daño mecánico en el equipo, principalmente en el cable de potencia, ocasionando una reducción de la vida útil del equipo y, en algunos casos, que quede inutilizable.

En este trabajo de grado se presenta una herramienta digital que estima la velocidad óptima y el ángulo de bajada del equipo BES para su correcta instalación en fondo, minimizando el daño mecánico del cable de potencia. Para esto se realizó un estudio con 32 pozos del efecto que tiene la trayectoria del pozo sobre la recurrencia de fallas en el cable de potencia de los equipos BES, durante este análisis se observó que tanto la inclinación como el cambio de azimut afectan la integridad del equipo al momento de su instalación en fondo, razón por la cual se consideró como parámetro para la recomendación de velocidad el valor de DLS. Teniendo en cuenta estos resultados se realizó un análisis estadístico con 22 pozos, obteniendo rangos de velocidades entre 6 J/h y 16 J/h los cuales corresponden a determinados rangos de valores de DLS. Posteriormente se programó en Excel la herramienta digital ANGVEL haciendo uso de Visual Basic como lenguaje de programación; sus datos de entrada son los valores de MD, inclinación y azimut, y como valores principales de salida, se encuentra la recomendación de velocidad a diferentes profundidades y dos recomendaciones para el ángulo de posicionamiento del cable sobre el equipo, la primera recomendación contempla la trayectoria y la segunda tiene en cuenta únicamente el azimut a la profundidad de instalación del equipo.

Del análisis estadístico se obtuvo que más de la mitad de los cables de potencia analizados quedan completamente inoperativos por lo cual se recomienda la implementación de ANGVEL en las operaciones futuras de instalación de equipos BES.

Palabras clave: Bombeo Electrosumergible, trayectoria pozo, cable potencia, herramienta digital.

INTRODUCCIÓN

Actualmente el método de levantamiento artificial más usado en Colombia es la bomba electrosumergible. Durante la instalación del equipo se presentan dos factores principales que afectan la integridad del cable: el primero hace referencia a la velocidad con la cual se baja el equipo a fondo, usualmente alta debido a la necesidad de reducir tiempo de operación y costos asociados, sin embargo, esto genera fricción entre la tubería de revestimiento y el equipo BES provocando su deterioro prematuro, en especial el del cable de potencia. El segundo factor es el ángulo con el cual se posiciona el equipo, este es de gran importancia pues cuando el ángulo de desviación del pozo es muy alto se generan choques y efecto de arrastre entre el cable y la tubería de revestimiento, lo que conlleva a un daño mecánico en el cable de potencia.

Cuando se presentan raspaduras o daño en la protección del cable, este queda expuesto a condiciones de temperatura muy elevada y gases corrosivos provenientes del pozo que afectan la integridad del cable de potencia. Con esto, la energía del equipo y los datos obtenidos en superficie se ven comprometidos; al detectar estos problemas, se requieren operaciones adicionales para reparación o cambio del cable, que produce un aumento en los costos de operación para ambas empresas, tanto la operadora como la prestadora de servicios.

En los estudios realizados por Del Pino et al, se encontró que cada daño ocurrido durante la bajada de los equipos BES se debe evaluar por separado, pero al mismo tiempo; debe proponerse una solución integral que prevenga todos estos riesgos operacionales. Además, en su estudio afirman que la velocidad de bajada influye en los daños del cable de potencia del equipo, principalmente por no tener en cuenta las desviaciones de pozo, ni la posición del cable, afectando directamente su integridad.¹⁴

De la misma forma, en un estudio de caso realizado por Sheldon et al, se corrobora la importancia que tiene el grado de curvatura del pozo durante la primera instalación y trabajos posteriores de workover de los equipos BES. Además, muestra de forma gráfica la incidencia del DLS sobre las fallas presentadas durante la instalación de estos SLA, al mismo tiempo, afirma que ignorar factores como peso, diámetro, longitud e intervalo de curvatura de la herramienta desencadenan en una instalación inadecuada que puede generar fallas en el equipo.¹⁵

De acuerdo a lo anterior se considera que es posible minimizar el daño mecánico en el cable de potencia del equipo BES durante su instalación en pozos con profundidades mayores a 6000 ft y DLS menores o iguales a 1, mediante la

¹⁴ Del Pino J.J et al. Implementation of Torque and Drag Analysis to Simulate Forces While Running in Hole Electric Submersible Pump – ESP Assemblies, to Reduce Power Cable Mechanical Damages. 2017.

¹⁵ SHELDON J, TREVISAN F, RADKE C, ALHANATI F. Leveraging Run-Life Data and Industry Collaboration in a Low-Cost Environment. 2017

estimación de la velocidad de bajada óptima y el ángulo de posicionamiento del cable sobre el equipo. Este proyecto se realiza con el fin de proporcionar una herramienta digital que satisfaga la hipótesis propuesta. Así, la empresa prestadora tendrá, mediante la herramienta digital, una mirada más técnica y estudiada sobre la manera en que se debe instalar este equipo en fondo, teniendo en cuenta los parámetros mencionados. De este modo, tanto las compañías operadoras como las prestadoras de servicios reducirían costos operacionales asociados a la intervención de pozos por daños del equipo, obteniendo menores tiempos no productivos durante la operación.

Para cumplir con lo planteado anteriormente, se propuso como objetivo general: “diseñar una herramienta digital para la estimación de la velocidad óptima y el ángulo de bajada del equipo BES para su correcta instalación en fondo, minimizando el daño mecánico del cable de potencia”, y como objetivos específicos:

1. Describir las generalidades y aplicaciones de los equipos BES.
2. Describir los factores principales que afectan la integridad del cable de potencia durante la instalación del equipo BES enfatizando en el ángulo de posicionamiento del cable y velocidad de bajada del equipo obtenidos de un análisis estadístico de lecciones aprendidas.
3. Describir el lenguaje de programación seleccionado para el desarrollo de la herramienta digital.
4. Desarrollar una herramienta digital que estime la velocidad óptima de bajada y la ubicación del equipo BES a partir de las características del pozo.
5. Validar los resultados de la herramienta digital con ayuda de softwares suministrados por la empresa.
6. Evaluar los costos asociados al daño del cable de potencia de un equipo BES durante la instalación en fondo, por medio de la comparación de costos en las operaciones exitosas con aquellas en las que no lo fueron.

SINOPSIS

El cuerpo principal del trabajo de grado se encuentra segmentado en cuatro capítulos: Marco Teórico, Metodología y Datos, Resultados y Análisis de Resultados. El cumplimiento de los objetivos propuestos se desarrolla a lo largo de estos capítulos. En el capítulo de Marco Teórico se desarrollan completamente los objetivos uno y tres, sobre el equipo BES y el lenguaje de programación utilizado para la herramienta digital; además, en él se describen los aspectos teóricos del segundo capítulo, que comprenden los factores que afectan el cable de potencia. En el capítulo de Metodología y Datos se muestra el funcionamiento de la herramienta digital, que corresponde con la explicación del objetivo tres, su desarrollo aplicado fue realizado conforme se avanzó en el proyecto. En el capítulo de Resultados se resuelven los objetivos restantes, correspondientes a la parte estadística del segundo objetivo, la validación y el análisis financiero. La discusión de los resultados se desarrolla en el capítulo de Análisis de Resultados, donde se muestra una profundización de todos los resultados obtenidos y su debida interpretación.

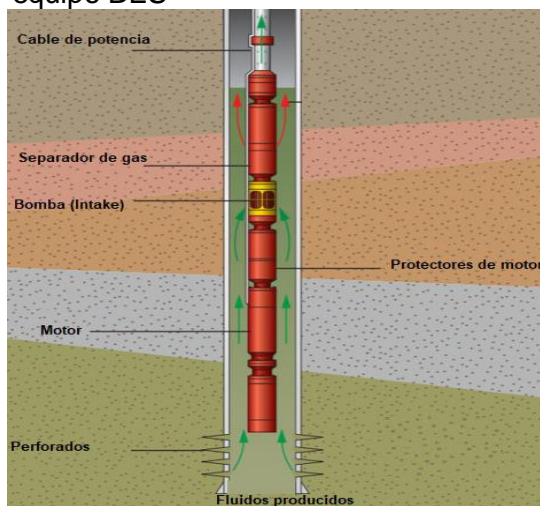
1. MARCO TEÓRICO

A continuación, se presenta el fundamento teórico sobre el cual se basó el presente trabajo de grado.

1.1 GENERALIDADES DEL EQUIPO BES

Uno de los sistemas de levantamiento artificial más usados en Colombia es el bombeo electrosumergible (BES); su principio de funcionamiento consiste en generar una diferencia de presión de los fluidos del pozo que entran por el intake de la bomba¹⁶ (Figura 1). Posteriormente, son sometidos a una gran fuerza centrífuga, ocasionada por la velocidad rotacional de las etapas, y pierden energía cinética en el difusor que se convertirá en la energía asociada al diferencial de presión. Debido a que el equipo BES puede bombear a presiones muy bajas, se considera un método económico y efectivo en términos de levantamiento de fluidos¹⁷. El equipo BES en fondo se compone principalmente de las siguientes partes: Bomba, separador de gas, motor, cable eléctrico o de potencia, y en algunos casos, un sensor de fondo (Figura 1).

Figura 1. Componentes de subsuelo del equipo BES



Fuente: elaboración propia basado en Resonant Link Technology Limited. Onshore and Offshore ESP VFD Systems [en línea].

<http://www.resonantlinktechnology.com/onshore-and-offshore-esp-vfd-systems/>

¹⁶ BAKER HUGHES. Op. Cit., p 25.

¹⁷ HOLLUND BS. Artificial Lift—Electrical Submerged Pump, Best Practice and Future Demands Within Subsea Applications. Stavanger City. University of Stavanger. 2010. p 11.

Entre las ventajas que posee este sistema de levantamiento artificial se encuentran las siguientes:

- Producción de altos volúmenes de líquido.
- Alta eficiencia, principalmente para pozos con producción por encima de 1000 bpd.
- Se usan en pozos desviados, siempre y cuando se ubique en una sección vertical o poco desviada.
- Requiere poco mantenimiento cuando la instalación se realiza bajo parámetros de diseño y se opere bajo recomendaciones.
- El equipo en superficie requiere un espacio mínimo, por lo cual se puede usar en locaciones urbanas.

Al mismo tiempo, presenta desventajas como:

- Para proporcionar la energía eléctrica al equipo debe estar disponible una fuente de alto voltaje.
- Cuando existe gas libre la bomba se deteriora más rápido y su eficiencia se ve afectada, inclusive puede detener la producción de líquido. (El uso de separadores de gas se recomienda cuando el gas libre que entra a la bomba supera el 5%).
- Los materiales abrasivos, como la arena, incrementan el desgaste del equipo. (Existen materiales resistentes a los ambientes abrasivos, pero aumentan el costo del equipo BES).
- Las altas temperaturas del pozo son un factor limitante para los equipos BES estándar, estos soportan aproximadamente 250 °F, para aumentar este rango, se usan materiales que pueden soportar hasta aproximadamente 400 °F.
- La producción de crudos con alta viscosidad aumenta el requerimiento de potencia del equipo y reducen el transporte del fluido hasta superficie¹⁸.

1.2 DESCRIPCIÓN DEL CABLE ELÉCTRICO O DE POTENCIA

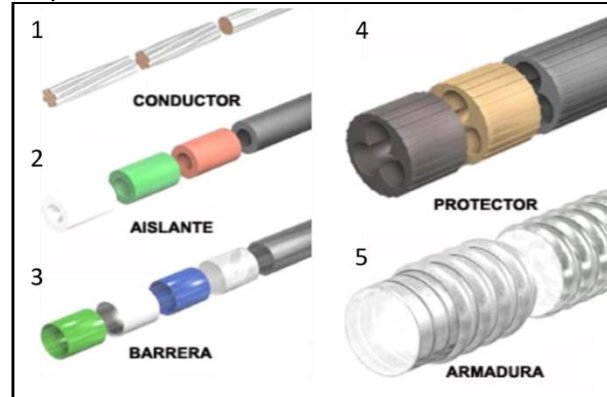
El cable de potencia es uno de los componentes más importantes y sensibles en los equipos BES, el éxito o fracaso de la aplicación depende en gran parte de la buena selección e instalación del cable de subsuelo. Tiene dos configuraciones básicas: plana y redonda; independiente de su configuración, el cable consiste en tres conductores sólidos o trenzados, la conexión del cable al motor se conoce como “pothead” o terminal de potencia, que es un punto crítico en la instalación.

El cable usa una protección para los conductores y una capa de estaño sobre cada uno para proveer una protección adicional contra fluidos provenientes del pozo, sobre cada conductor se ubica un aislamiento y una barrera protectora o malla.

¹⁸ TACACKS Gabor. Electrical Submersible Pumps Manual Design, Operations and Maintenance. Gulf Professional Publishing. 2017

Posteriormente, el cable es recubierto con una camisa que se encarga de la protección química y finalmente es acorazado (Figura 2).¹⁹

Figura 2. Partes y protección del cable de potencia



Fuente: elaboración propia basado en BUSTAMANTE VILLAMAR, Daniel. Ibid., 47 p

1.3 INSTALACIÓN DEL EQUIPO BES

Para la instalación de los equipos BES en fondo, es importante conocer los aspectos básicos antes y durante esta operación, los cuales se describen a continuación. Los aspectos básicos para tener en cuenta previos a la instalación del equipo BES son los siguientes:

1.3.1 Verificación del diámetro de la herramienta. Se debe verificar que el tipo y serie de la bomba seleccionada sea de un diámetro menor de la tubería de revestimiento. Usualmente las bombas con serie 400 hacen referencia a un diámetro exterior de 4 pulgadas y la serie 562 a uno de 5.62 pulgadas. Adicionalmente, se debe tener en cuenta el diámetro externo de la guía del motor y asegurar que sea menor al diámetro mínimo interno de la tubería de revestimiento.²⁰

1.3.2 Nivel de fluido y zonas con desviación. Para el posicionamiento en fondo del equipo BES se requiere conocer el nivel del fluido entrante o de interés y las zonas con desviación, debido a que se recomienda su posicionamiento en zonas con bajo Dog Leg.²¹

¹⁹ BUSTAMANTE VILLAMAR, Daniel. Metodología para el Desarrollo de un Programa de Computo para el Diseño de Bombeo Electrosumergible y su Aplicación. Guayaquil, 2007. Trabajo de grado (Ingeniero en Petróleos). Escuela Superior Politécnica del Litoral. Facultad de Ingeniería en Ciencias de la Tierra. 47 p.

²⁰ HOLLUND BS, Op. Cit., p 74.

²¹ ESP OIL INTERNATIONAL TRAINING GROUP. (2004: Venezuela) Bombeo Electrosumergible: Análisis, Diseño, Optimización y Trouble Shooting, 2004. p 20.

1.3.3 Factores mecánicos. Para la selección de la configuración del cable de potencia (Plano/redondo), se deben tener en cuenta los factores mecánicos presentes y el diámetro o espacio que se dispone para la instalación.²²

1.3.4 Geometría del pozo. Según las desviaciones que existan en el pozo se usan protectores de cable y guarda cables que protegen el cable de potencia de daños mecánicos durante el proceso de instalación. Estos accesorios mantienen el cable en la posición deseada y absorben impactos con la tubería de revestimiento cuando se está bajando el equipo. No se recomienda usar el guarda cables en los casos de trayectorias con desviaciones altas, debido a que se genera una reducción de diámetro y se podrían causar daños mecánicos al equipo.²³

Ahora bien, aquellos aspectos básicos que se deben tener en cuenta durante la instalación del equipo BES son los que se describen a continuación:

1.3.5 Geometría de pozo durante la instalación. Es uno de los principales factores que afectan la integridad del equipo, es importante que todo el personal relacionado con la instalación tenga conocimiento del estado actual del pozo, a partir de los estados mecánicos, reportes de campo y surveys, principalmente.

Los surveys proporcionan datos definitivos que representan la posición y trayectoria de un pozo en un espacio tridimensional.²⁴ En un survey se encuentra información de profundidades (MD y TVD), inclinación y azimuth, como también coordenadas UTM de la trayectoria del pozo.

En la figura 3, se muestra una representación visual de un pozo direccional a partir de los planos de corte vertical y horizontal, también llamados planos de inclinación y dirección respectivamente. Se define como TVD la distancia vertical desde la mesa rotaria hasta el punto B, y como MD, la distancia desde la mesa rotaria, medida a lo largo del pozo. El ángulo de inclinación (ϕ) hace referencia al ángulo formado entre la vertical y el pozo, mientras que, el ángulo de dirección es el azimuth (θ) entre el norte geográfico y la proyección del pozo en el plano horizontal.²⁵

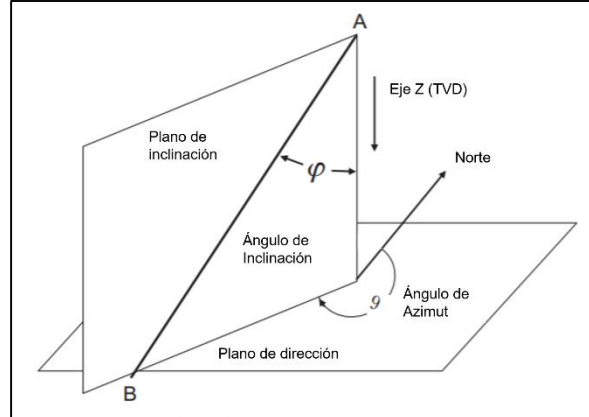
²² Ibid., p 29.

²³ Ibid., p 33.

²⁴ HALLIBURTON. Wellbore Surveying. [en línea]. <<https://www.halliburton.com/en-US/ps/sperry/drilling/measurement-while-drilling/wellbore-surveying/default.html#targetText=Wellbore%20Surveying,path%20in%20three%2Ddimensional%20space.>>

²⁵ MITCHEL Robert, MISKA Stefan. Op. Cit., 450 p.

Figura 3. Inclinación y ángulos de azimut



Fuente: elaboración propia basado en MITCHEL Robert, MISKA Stefan. Fundamentals of Drilling Engineering. Vol 12. Texas: SPE, 2011. 451 p.

Otro parámetro a tener en cuenta es el DLS, este se define como la curvatura del pozo expresada en grados /100 pies o /30 metros. Entre los métodos más usados para cálculos de trayectoria de pozo se encuentran: método tangencial, método de ángulos promedios, radio de curvatura y radio mínimo de curvatura. Este último es el más utilizado en la industria petrolera durante la planeación de trayectoria de pozos y evaluación de surveys direccionales, propuesto originalmente por Taylor y Mason (1972) y por Zaremba (1973).²⁶ Asume que el pozo es un arco de circunferencia con mínima curvatura (máximo radio de curvatura) entre dos estaciones de registros direccionales. Este método es el más preciso para la mayoría de las trayectorias de pozos.²⁷

Teniendo la información anterior, se presentan las siguientes recomendaciones:

- Discutir e informar sobre la geometría del pozo y zonas de alto riesgo durante la bajada del equipo BES.
- Tener en el pozo los registros direccionales para verificar las zonas de alto dog leg.
- No bajar el equipo hasta que se reparen las partes en el caso de que la tubería de revestimiento esté dañada.

1.3.6 Excesiva velocidad de bajada del equipo BES. Es muy importante mencionar que dentro del equipo de fondo que se va a instalar, hay accesorios, conexiones eléctricas y partes electrónicas que pueden tener materiales de protección resistentes a la corrosión, pero débiles a los daños mecánicos. Si la velocidad de bajada del equipo es excesiva, se genera una fricción entre la carcasa

²⁶ Ibid., p 469.

²⁷ VELASQUEZ GOMEZ, Eduardo. CAMACHO, Eliodoro. Perforación Direccional. [en línea]. <https://issuu.com/ingenierocarlosmariocortez/docs/perfo_direccional>

de los equipos y la tubería de revestimiento, que puede desencadenar en elementos rotos o dañados. Así mismo, si el cable de potencia se somete a una fricción constante y se ubica de tal manera que reciba el peso del equipo, se debilita el aislamiento repercutiendo en el tiempo de vida útil del equipo BES. En casos en los que se usa un tubo capilar, si este sufre daños, la operación de inyección queda anulada, afectando la optimización del equipo BES y ocasionando incremento de costos por pérdida del tubo capilar. Por otro lado, la excesiva vibración del equipo de fondo cuando se realizan paradas bruscas por el perforador del taladro puede afectar el torque de los pernos de los equipos BES. En estos casos, un perno flojo puede ocasionar problemas de pesca y/o pérdida de pozo.

1.3.7 Cable de Potencia golpeado durante la bajada del equipo BES con las cuñas del taladro/mesa rotaria. Durante la bajada del equipo BES con el cable de potencia se debe tener especial cuidado con la posición del cable para que en ningún momento se generen problemas de aplastamiento por las cuñas o por tubería conductora del taladro. Cuando el problema es reportado a tiempo es posible realizar una acción de remediación del equipo, sin embargo, en muchos casos el problema se esconde y eso provoca incertidumbre del tiempo de vida útil del equipo BES en fondo. Por lo tanto, con el fin de evitar este tipo de daño se recomienda mantener la vigilancia de la operación por parte del equipo encargado del procedimiento, no apurar las operaciones, evitar las rotaciones del personal y hacer una revisión previa de las herramientas de la mesa rotaria que se utilizarán en la bajada del equipo BES para verificar que estén en óptimas condiciones²⁸.

1.4 FALLAS DEL CABLE DE POTENCIA

En un estudio realizado por D. H Neuroth, se encontró que el 60% de las operaciones de workover de las bombas BES, se asocian a problemas eléctricos por las siguientes causas, organizadas por orden de importancia:

- Falla del empalme del cable plano del motor
- Falla resultante del daño mecánico durante la instalación y servicio
- Falla por ruptura de descompresión
- Falla eléctrica debido a altas temperaturas de operación y ataques de químicos.

²⁹

Como objeto de esta tesis se realiza un enfoque hacia las fallas eléctricas que a su vez contemplan daños mecánicos en el cable de potencia durante la instalación del equipo.

²⁸ESP OIL INTERNATIONAL TRAINING GROUP, Op. Cit., p 70

²⁹ NEUROTH, Heike. Design Features of Improved Electric Submersible Pump Cable To Withstand Installation and Service Conditions. Texas. 1985.

De acuerdo con la información obtenida de las lecciones aprendidas se obtiene una clasificación por parte de BHGE respecto a los daños del cable de potencia durante la instalación del equipo BES:

- Usado operativo: Se refiere al cable de potencia del equipo BES que ha sido usado en anteriores corridas y que ha tenido reparaciones menores, pero que se encuentra en condiciones operativas para su uso posterior.
- Usado chatarra: Se refiere al cable de potencia del equipo BES que ha sido usado en anteriores corridas y que está totalmente dañado, considerado como chatarra.
- Nuevo operativo: Se refiere al cable que no ha sido usado en corridas anteriores y que según los resultados de las pruebas realizadas se encuentra en condiciones óptimas para su uso.

1.5 DESCRIPCIÓN DEL LENGUAJE DE PROGRAMACIÓN

La herramienta digital (ANGVEL) se realizó en el *software* Excel 2010 perteneciente al conjunto de programas de Microsoft Office, paquete donde también se encuentran aplicaciones como Power Point, Word, Acces y Outlook. Excel es un aplicativo que permite la creación de hojas de cálculo, a partir de una cuadrícula de celdas en las que se pueden introducir caracteres alfanuméricos y realizar diferentes operaciones con ellas. Es ampliamente utilizado a nivel académico y profesional, debido a que realiza cálculos rápidamente, edita los valores de las celdas y almacena gran cantidad de información de manera organizada. También permite generar gráficos a partir de datos introducidos por el usuario, crear tablas, filtros y realizar otras funciones que permiten al usuario manejar información con mayor facilidad y optimizar tiempo.³⁰

Además, Excel maneja una función llamada “Macros”, la cual permite automatizar varias tareas y ejecutarlas como si se tratara de una sola, por ejemplo, crear un botón que al pulsarlo permita mostrar o esconder columnas, cambiar la fuente y el tamaño de las letras, y colorear las celdas. Las macros se pueden crear automáticamente mediante la opción “Grabar Macro”, donde el usuario puede realizar las acciones que requiere automatizar y al detenerla tiene la opción de almacenarla en un comando de tipo CTRL + Letra que podrá ser usado cuando desee ejecutarla nuevamente. El código generado para esta funcionalidad está en lenguaje Visual Basic, el cual es modificable con el editor de programación al en la pestaña de “Desarrollador/Programador” de Excel.³¹

³⁰ BRIIK. Manual Microsoft Office Excel 2010, p.5. Disponible en línea: <https://www.uv.mx/personal/llopez/files/2013/03/Manual-Microsoft-Office-Excel-2010.pdf>

³¹ Ibid., p. 134-137

2. METODOLOGÍA Y DATOS

En este capítulo se describen los datos utilizados durante el desarrollo del proyecto, además de la explicación paso a paso del procedimiento que se siguió para su realización.

2.1 DATOS

Los datos utilizados en este trabajo se rigen bajo un acuerdo de confidencialidad estipulado entre los autores de la tesis y la empresa con la que se desarrolla, en este caso corresponde a Baker Hughes a GE Company, por lo tanto, no se hará mención del nombre ni las coordenadas de los pozos de estudio.

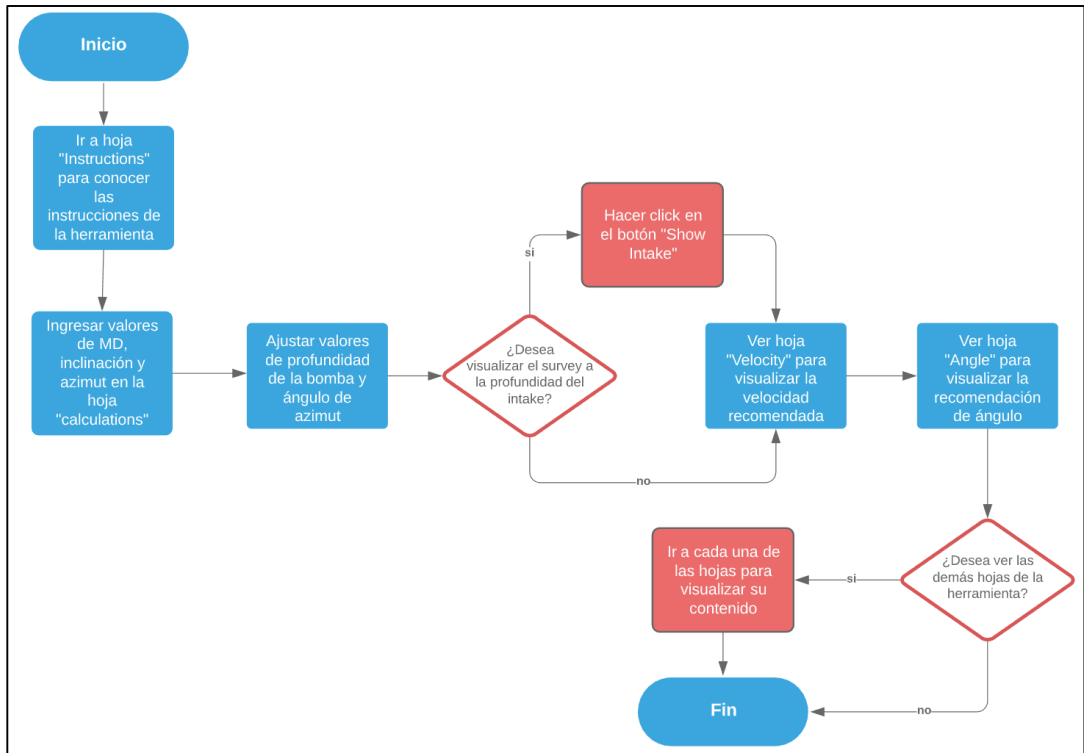
Se cuenta con reportes de 60 cables de potencia de equipos BES en los cuales se describe el estado, reparaciones y mantenimiento de estos. También con surveys de 31 pozos cuyo sistema de levantamiento artificial corresponde a BES instalado en los últimos dos años, en los cuales se registran datos de MD, TVD, inclinación, azimut, coordenadas, *offsets* de norte y este y DLS. Adicional se cuenta con 22 reportes de instalación correspondientes a los pozos mencionados anteriormente en los cuales se describe el paso a paso que siguió la operación de instalación en fondo, aspectos a considerar y profundidades de asentamiento del equipo BES. Los pozos considerados en este proyecto tienen tubería de revestimiento con diámetro de 7 pulgadas y peso nominal 26 o 29 lb/ ft, con profundidades mayores a 6000 ft. El material fue considerado como un estándar dado por la empresa, para el cual se trabajó un coeficiente de fricción constante de 0,2. Para realizar la validación se contó con la disponibilidad de dos *softwares*, Autograph y uno confidencial interno usado por BHGE, disponibilidad del personal capacitado en la empresa, dos pozos que cumplen con los parámetros descritos anteriormente, con equipos BES de motor 5,62 pulgadas y bombas de 4 y 5,38 pulgadas. Por último, para el análisis financiero la empresa suministró datos de costos de equipos, servicio de instalación y garantías asociadas a los daños por golpe en el cable de potencia, así como la proyección de ventas hasta el año 2022.

2.2 METODOLOGÍA

A continuación, se presenta la metodología que se siguió para el desarrollo de este trabajo de grado.

2.2.1 Herramienta digital (ANGVEL). El desarrollo de la herramienta digital propuesta, al igual que los análisis estadísticos establecidos en este trabajo de grado fueron realizados con ayuda del *software* Microsoft Excel que internamente cuenta con una herramienta de Desarrollador, la cual permite al usuario la creación de Macros en lenguaje de programación Visual Basic. El diagrama de flujo (figura 4) muestra, de manera general, las funcionalidades de ANGVEL

Figura 4. Diagrama de flujo del funcionamiento general de ANGVEL



Fuente: elaboración propia

A continuación, se presenta el fundamento teórico de la programación de la herramienta digital, la cual está pensada para que sea utilizada, principalmente, por operadores de campo, por lo tanto, con el fin de permitir que sea ampliamente aprovechada se desarrolló en un libro de Excel que cuenta con 10 hojas de cálculo, las cuales contienen lo siguiente:

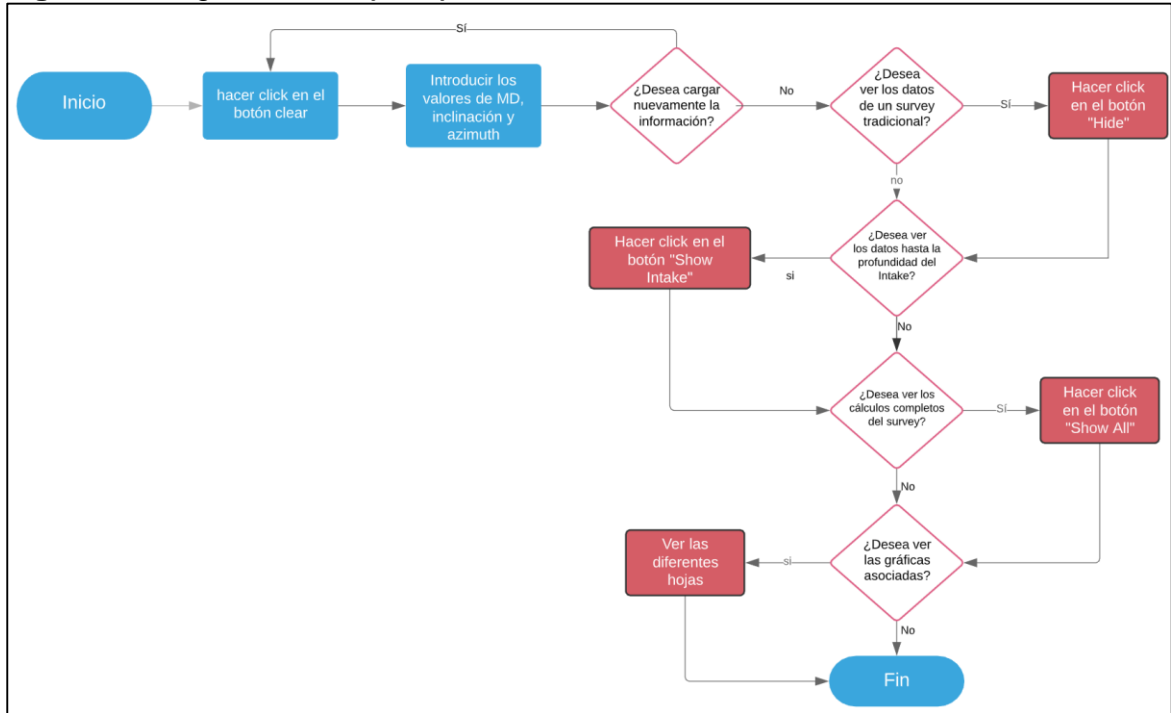
2.2.1.1 Hoja Welcome. (Anexo A) En esta hoja se presenta la herramienta digital que tiene por nombre “ANGVEL ESP INSTALLATION”, desarrollada por los autores de esta tesis y patrocinado por BHGE.

2.2.1.2 Hoja Instructions. (Anexo B) Presenta el modo de uso de que debe realizar el usuario para el correcto funcionamiento de ANGVEL. Se muestra un instructivo paso a paso en inglés y español de lo que requieren las hojas Calculations, Angle y Velocity, junto con lo que realiza cada uno de los botones que se encuentran en la herramienta digital.

2.2.1.3 Hoja Calculations. (Anexo C) En esta hoja se realizan todos los cálculos matemáticos que ejecuta la herramienta. El usuario deberá introducir las tres (3) primeras columnas de datos que corresponden a MD (en pies), Inclinación (en grados) y Azimut (en grados), además, podrá introducir el ángulo al cual desea ver

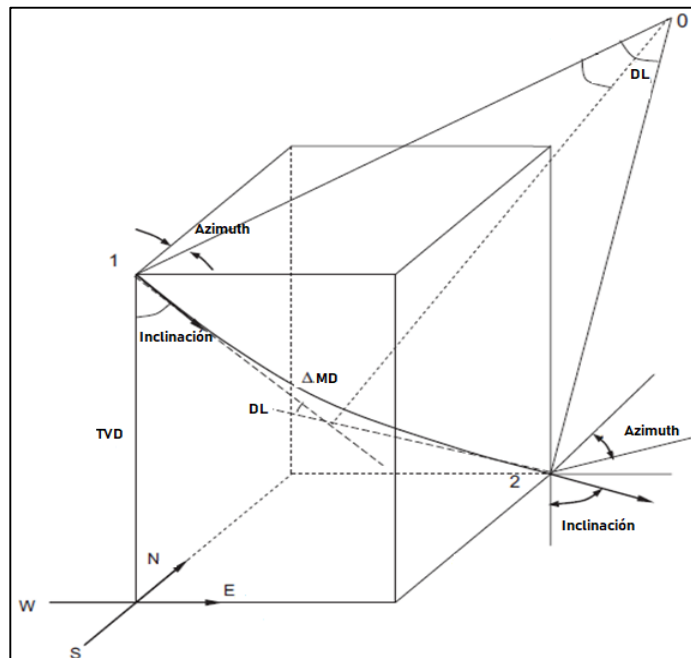
la trayectoria de pozo en Vertical Section Azimut (deberá estar entre 0 y 360 grados), así como la profundidad del intake de la bomba (en pies). Al introducir estos valores la herramienta automáticamente generará un survey del pozo cargado, con lo cual obtendrá los datos de TVD, norte, este, DLS, Vertical Section y un delta de Azimut. Para obtener dichos valores se revisó la figura 6 y se utilizó el método de mínima curvatura al ser considerado como el más aproximado para describir la trayectoria de un pozo petrolero.

Figura 5. Diagrama de flujo hoja Calculations



Fuente: elaboración propia

Figura 6. Diagrama esquemático de un pozo considerando el método de mínima curvatura



Fuente: elaboración propia basado en MITCHEL Robert, MISKA Stefan. Fundamentals of Drilling Engineering. Vol 12. Texas: SPE, 2011. p.470

A partir de esta consideración se utilizaron las siguientes ecuaciones para realizar el survey del pozo:

Ecuación 1. Cálculo del Ratio Factor

$$RF = \frac{\Delta MD}{DLS} * \tan\left(\frac{DLS}{2}\right)$$

Fuente: MITCHEL Robert, MISKA Stefan. Fundamentals of Drilling Engineering. Vol 12. Texas: SPE, 2011. p. 470

Ecuación 2. Cálculo de Norte

$$Norte(i + 1) = Norte(i) + RF * (Sin(Incl_1) * Cos(Az_1) + Sin(Incl_2) * Cos(Az_2))$$

Fuente: MITCHEL Robert, MISKA Stefan. Fundamentals of Drilling Engineering. Vol 12. Texas: SPE, 2011. p. 469

Ecuación 3. Cálculo del Este

$$Este(i + 1) = Este(i) + RF * (Sin(Incl_1) * Sin(Az_1) + Sin(Incl_2) * Sin(Az_2))$$

Fuente: MITCHEL Robert, MISKA Stefan. Fundamentals of Drilling Engineering. Vol 12. Texas: SPE, 2011. p. 469

Ecuación 4. Cálculo del TVD

$$TVD(i + 1) = TVD(i) + RF * (Cos(Incl_1) + Cos(Incl_2))$$

Fuente: MITCHEL Robert, MISKA Stefan. Fundamentals of Drilling Engineering. Vol 12. Texas: SPE, 2011. p. 470

Ecuación 5. Cálculo del DL

$$DL = 2 \arcsin \left(\sqrt{\sin^2 \left(\frac{Incl_2 - Incl_1}{2} \right) + \sin(Incl_1) * \sin(Incl_2) * \sin^2 \left(\frac{Az_2 - Az_1}{2} \right)} \right)$$

Fuente: MITCHEL Robert, MISKA Stefan. Fundamentals of Drilling Engineering. Vol 12. Texas: SPE, 2011. p. 458

Ecuación 6. Cálculo del Course Length

$$CL = RF * (Cos(Incl_1) + Cos(Incl_2))$$

Fuente: MITCHEL Robert, MISKA Stefan. Fundamentals of Drilling Engineering. Vol 12. Texas: SPE, 2011. p. 470

Ecuación 7. Cálculo del DLS

$$DLS = \frac{DL * 100 \text{ ft}}{CL}$$

Fuente: SCHLUMBERGER. Registros Direccionales, p.48

Ecuación 8. Cálculo de Closure Distance

$$CD = \sqrt{Norte^2 + Este^2}$$

Fuente: PRECISION DRILLING.
Cálculos direccionales, p.10

Ecuación 9. Cálculo de Closure Angle

$$CA = \tan^{-1}\left(\frac{Este}{Norte}\right)$$

Fuente: PRECISION DRILLING.
Cálculos direccionales, p.11

Ecuación 10. Cálculo de Directional Difference

$$DD = VSA - CA$$

Fuente: PRECISION DRILLING.
Cálculos direccionales, p.12

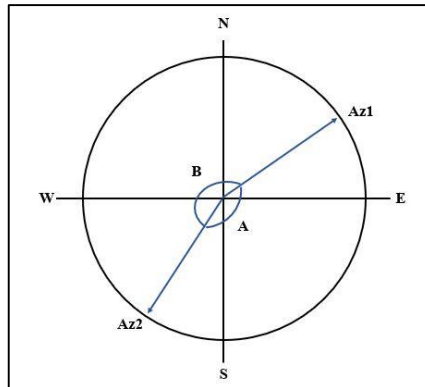
Ecuación 11. Cálculo de Vertical Section

$$VS = CD * \cos(DD)$$

Fuente: PRECISION DRILLING. Cálculos direccionales, p.13

Para realizar el Δ Azimut se consideraron dos ángulos de azimut (Az1 y Az2) pertenecientes a cualquier cuadrante (Figura 7), y dos valores A y B (Ecuaciones 12 y 13), de modo que se busca el menor ángulo entre ellos para considerarlo como el ángulo real.

Figura 7. Delta de Azimut



Fuente: elaboración propia

Ecuación 12. Cálculo de A

$$A = |Az2 - Az1|$$

Fuente: elaboración propia

Ecuación 13. Cálculo de B

$$B = |360 - A|$$

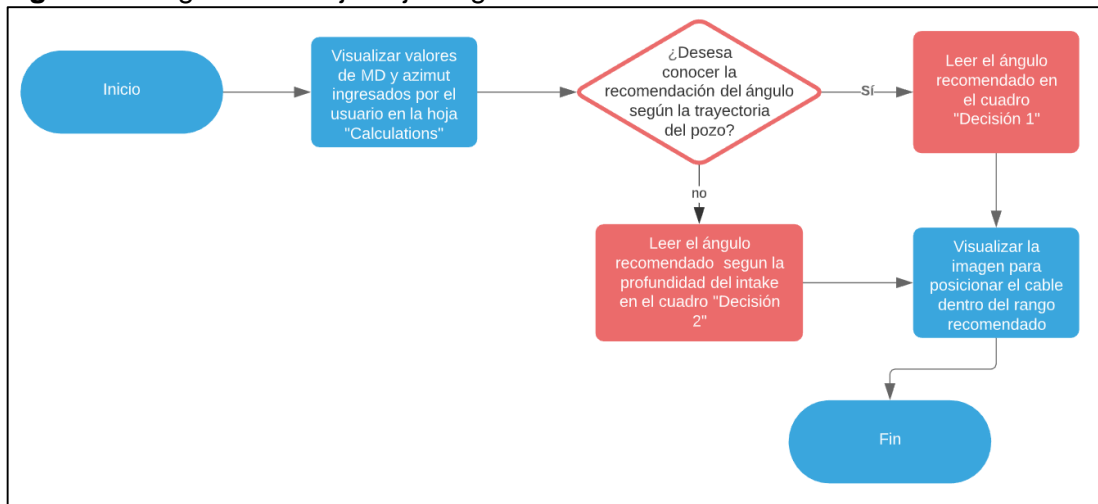
Fuente: elaboración propia

Además de generar el survey del pozo, la hoja realiza cálculos que van hasta la profundidad del intake de la bomba BES, del mismo modo que los anteriores, pero con el filtro de la profundidad. Adicionalmente, calcula un Δ Azimuth, el cual registra los cambios de azimuth que tendría que soportar la herramienta al momento de realizar su bajada de instalación, considerando el menor ángulo posible de giro del equipo. Esta hoja incluye cuatro botones programados:

- Botón Clear: borra todas las celdas contenidas en MD, Inclination y Azimuth
- Botón Show All: muestra todas las columnas con los cálculos realizados
- Botón Show Intake: muestra las columnas que contienen los cálculos hasta la profundidad del intake de la bomba BES ingresada por parámetro
- Botón Hide: oculta todas las columnas que no se muestran típicamente en un survey, dejando visibles únicamente las que contienen MD, Inclination, Azimuth, TVD, Norte, Este, DLS y Vertical Section.

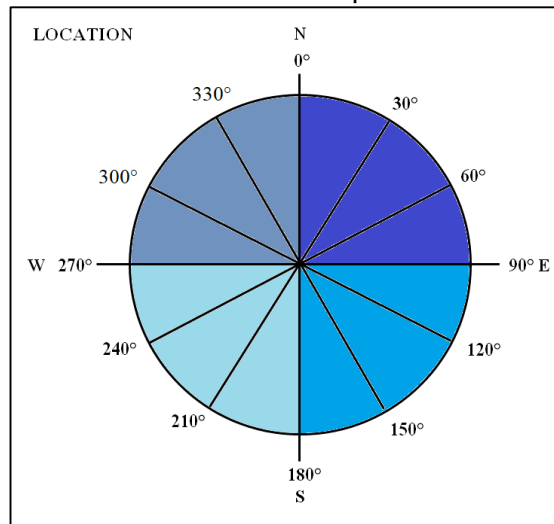
2.2.1.4 Hoja Angle. (Anexo D) En esta hoja se muestra una de las dos partes fundamentales del presente trabajo, al acceder a ella el usuario podrá leer dos recomendaciones para escoger el ángulo de posicionamiento del cable de potencia. Esta hoja se fundamenta en dos criterios: el primero, considera los cambios de azimut presentes durante la trayectoria del pozo, mientras que el segundo considera únicamente el azimut a la profundidad de instalación del equipo BES. Otorga al usuario dicha recomendación y muestra un diagrama con las diferentes ubicaciones tenidas en cuenta (Figura 9).

Figura 8. Diagrama de flujo hoja Angle



Fuente: elaboración propia

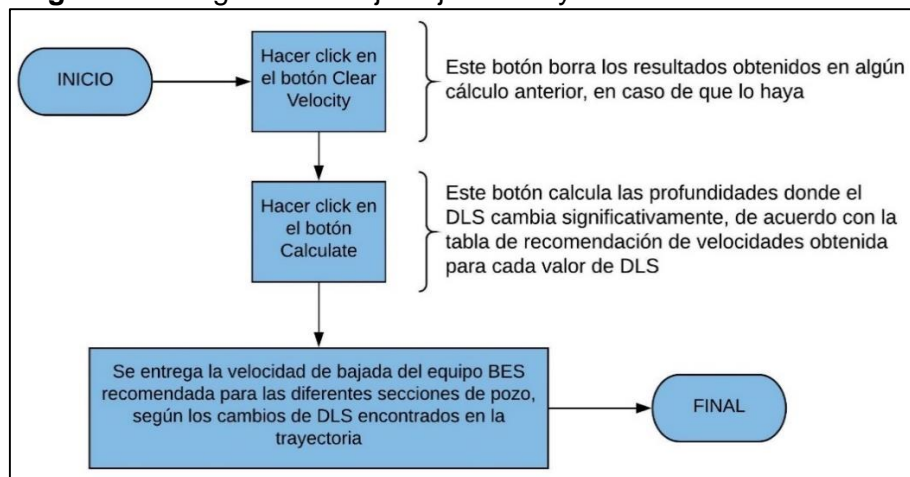
Figura 9. Diagrama de las posibles ubicaciones del cable de potencia



Fuente: elaboración propia

2.2.1.5 Hoja Velocity. (Anexo E) Esta hoja realiza la segunda parte fundamental del presente trabajo, donde muestra al usuario la recomendación de la velocidad de bajada óptima del equipo BES, de acuerdo con el DLS encontrado durante la trayectoria del pozo. Se pueden observar diferentes valores de velocidad que varían según el DLS a determinadas profundidades, para tener en cuenta que la velocidad de bajada siempre va a disminuir conforme se alcanzan mayores profundidades. Este cálculo de la velocidad fue obtenido a partir del análisis estadístico de los reportes de instalación, que se muestra más adelante en el capítulo de resultados.

Figura 10. Diagrama de flujo hoja Velocity



Fuente: elaboración propia

2.2.1.6 Hoja Trajectory. (Anexo F) En esta hoja el usuario podrá tener acceso a la trayectoria del pozo en cada una de las secciones de azimut entre 0 y 360 grados, que habrá definido previamente en la hoja calculations. esta gráfica de todo el pozo se mostrará en color azul y se calcula utilizando los datos de TVD en el eje vertical y los de vs en la horizontal. además, en caso de que el usuario desee ver el pozo hasta la profundidad del intake de la bomba deberá hacer clic en el botón show intake en la hoja calculations y se mostrará la trayectoria hasta el intake en color naranja.

2.2.1.7 Hoja Plan View. (Anexo G) En esta hoja se muestra al usuario el recorrido que realizará la herramienta en una vista de planta, de modo que se tendrán los datos del Este en el eje horizontal y los del Norte en el eje vertical.

2.2.1.8 Hoja Inclination. (Anexo H) En esta hoja se muestran los datos de inclinación con respecto a MD, de modo que el usuario podrá observar las variaciones de inclinación que tiene el pozo a lo largo de toda su trayectoria. Adicionalmente, en caso de haber seleccionado el botón show intake, se mostrará una línea vertical en la profundidad a la que se encuentre el intake de la bomba, haciendo que sea más amigable al usuario poder analizar los puntos más críticos de la trayectoria hasta antes de realizar la instalación de la bomba.

2.2.1.9 Hoja Azimuth. (Anexo I) aquí el usuario podrá observar los cambios de azimuth que tiene la herramienta a lo largo de la trayectoria del pozo, es decir, para cada valor de MD. además, al igual que en la hoja inclination, el usuario podrá observar la línea vertical con la profundidad señalada para el intake de la bomba en caso de que así lo desee.

2.2.1.10 Hoja DLS. (Anexo J) esta hoja muestra los DLS calculados por el método de mínima curvatura aplicado en esta herramienta para cada valor de md. también podrá tener acceso a la visualización de la profundidad del intake de la bomba.

2.2.2 Análisis Estadístico. El análisis estadístico se realizó al mismo tiempo que se programó la herramienta digital, debido a que para obtener algunos de los parámetros considerados en este, fue necesario contar con los resultados arrojados por ANGVEL. El procedimiento que se siguió fue el siguiente:

1. Se realizó una clasificación con 60 pozos de diferentes campos y se clasificaron en dos grupos según el estado del cable de potencia descrito en el capítulo 1.
2. Se utilizaron las ecuaciones 1 a 13 para realizar los cálculos de datos relacionados con la trayectoria de 31 pozos: Norte, Este, TVD, VS y DLS en cada uno de los pozos. Estos datos se obtuvieron por medio de la herramienta digital programada.
3. Se identificaron los valores máximos de DLS, inclinación y cambio de azimuth en cada pozo y se realizó una gráfica comparativa por cada parámetro que incluye tanto los pozos con fallas como los pozos sin fallas.
4. Se realizó una gráfica adicional con datos de 25 pozos que muestra valores de inclinación mayores a 8° relacionándolos con los cambios de azimuth máximos para cada pozo. Los que fueron descartados no cumplían con la condición de tener alguna inclinación por encima de los 8° o no presentaban variación de azimuth para el rango requerido.
5. Se analizaron los 22 reportes de instalación junto con los surveys respectivos y con esto se dio respuesta a algunas preguntas planteadas por los autores:
 - ¿Por qué durante la instalación del equipo BES disminuyen o aumentan la velocidad de bajada?
 - ¿Cuál es la relación existente entre el aumento o la disminución de la velocidad de bajada con el DLS? ¿El DLS favorece o no la tendencia a presentar fallas en el cable de potencia de los equipos BES?
 - ¿Cuál es la velocidad de bajada óptima para recomendar la instalación en fondo del equipo BES?
6. La primera pregunta se respondió al leer los históricos de instalación que se encontraban en cada reporte.
7. La segunda pregunta se respondió por medio de una clasificación que relaciona los datos de DLS obtenidos a partir de los surveys y las velocidades de bajada

obtenidas de los reportes de instalación, esta clasificación se hizo por medio de tablas y se mostró gráficamente, incluyendo tanto el grupo de pozos que falló como el que no falló.

8. La tercera pregunta se respondió a partir del análisis de los resultados del punto 7 y se sintetizó en una tabla que arroja el rango óptimo de velocidad recomendada para los diferentes valores de DLS.
9. Para determinar el ángulo de bajada se fijaron los dos parámetros descritos en la Hoja Angle de la herramienta digital.

2.2.3 Validación. La validación de ANGVEL se realizó por medio de dos softwares que contaba la empresa a disposición en el momento, uno de ellos Autograph y el otro, de nombre confidencial, es de uso interno de BHGE. Con estos se realizó el siguiente procedimiento:

1. A través del software confidencial de uso interno de BHGE, se validaron los puntos de MD correspondientes a cada valor de DLS obtenidos de ANGVEL.
2. Los resultados del software se presentan mediante dos graficas por cada pozo que muestran las fuerzas laterales y el esfuerzo de la herramienta versus la profundidad medida. Estos se comparan con la gráfica de DLS vs MD y las profundidades correspondientes a los DLS identificados en la hoja "Velocity" obtenidos de ANGVEL.
3. Con los datos de MD obtenidos anteriormente, se seleccionaron 2 puntos en cada pozo y se clasificaron como caso 1 y 2 para cada pozo, los cuales se analizaron a partir de los valores de DLS e inclinación en el software Autograph.
4. Se realizaron tablas de resultados de ambos pozos en las cuales se muestran los datos obtenidos de Autograph y cálculos realizados respecto al esfuerzo y flexión de la herramienta a partir de las ecuaciones 14 y 15:

Ecuación 14. Bending moment

$$M = F \times r = F * \cos(\theta) * r$$

Fuente: elaboración Propia basado en BRAGADO, Ignacio, Física General. España. 2004. 54p.

Ecuación 15. Bending Stress

$$\sigma = \frac{M c}{I}$$

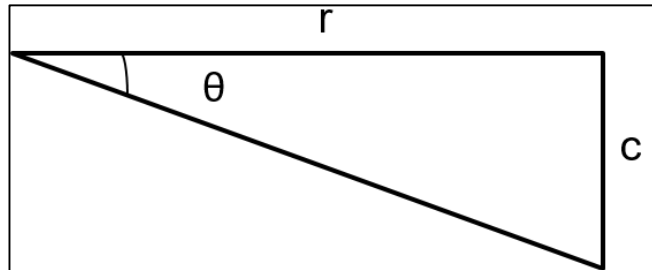
Fuente: elaboración propia basado en McKeen, L. W. Introduction to Fatigue and Tribology of Plastics and Elastomers. 2p.

Ecuación 16. Cálculo Bending Stress

$$\sigma = \frac{F * \cos(\theta) * r * c}{I}$$

Fuente: elaboración propia

Figura 11. Representación gráfica de la flexión de la herramienta



Fuente: elaboración propia

2.2.4 Análisis Financiero. El desarrollo de este análisis se hizo por medio del cálculo del VPN para dos flujos de efectivo: uno cuando la empresa realiza la instalación de manera correcta y otro cuando se presentan fallas que conllevan a gastos adicionales por pago de garantías. También, se realizó una proyección a tres años, asumiendo una venta fija de equipos BES al año. El procedimiento realizado se describe a continuación:

1. Para realizar el análisis financiero se describieron los ingresos y egresos de BHGE en un periodo de 3 años correspondientes a las ventas de los equipos BES para un campo determinado
2. Se realizó el flujo de caja para dos escenarios, el primero muestra el caso en el cual BHGE tuvo que asumir costos por garantías de golpes en el cable de potencia y el segundo muestra un caso hipotético en el que no se pagaron garantías.
3. Se calculó el valor presente neto para ambos flujos de efectivo usando la ecuación 17

Ecuación 17. Cálculo del VPN

$$VPN = -INV + \sum_{t=1}^n (Vt/(1+i))^n$$

Fuente: elaboración propia basado en GRANDEL, María. Como calcular el valor presente neto. Ejemplos. 2018.

4. Con los resultados obtenidos en el paso anterior, se realizó una comparación entre estos y se mostró en forma porcentual la diferencia en cada caso.
5. Se realizó una proyección a tres años que asume la venta de 20 equipos anuales, sin considerar gastos por cobertura de garantías.

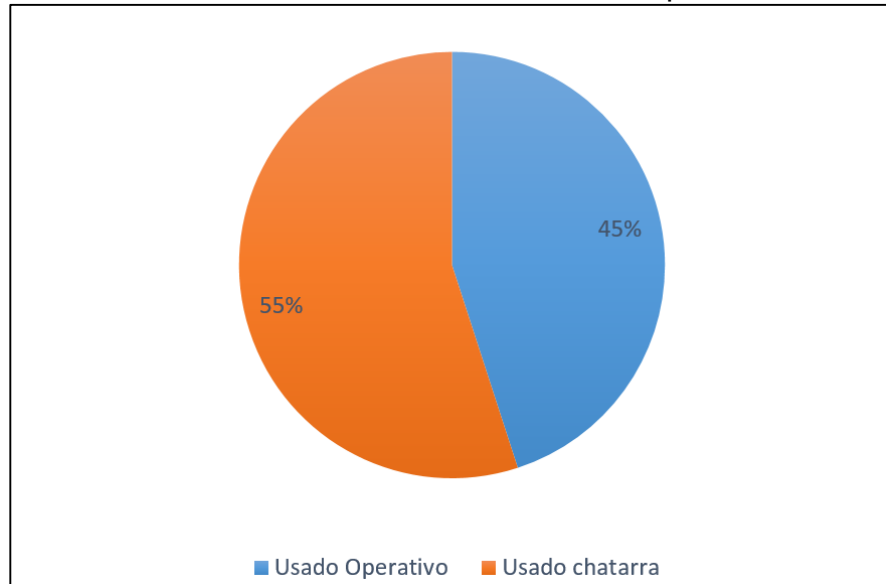
3. RESULTADOS

A continuación, se presentan los resultados obtenidos del análisis estadístico, la validación y el análisis financiero que fueron necesarios para el desarrollo del presente trabajo de grado.

3.1 ANÁLISIS ESTADÍSTICO

A partir de la clasificación de los daños del cable de potencia durante la instalación del equipo BES presentado por BHGE, se omitieron los cables que corresponden a “Nuevos operativos” debido a que el presente trabajo se enfoca en los daños ocasionados en el cable. De 60 cables analizados se obtuvieron los siguientes resultados porcentuales de clasificación de fallas del cable de potencia, en color naranja se muestran los “Usado chatarra”, en azul los “Usado operativo”.

Gráfica 1. Clasificación de fallas del cable de potencia

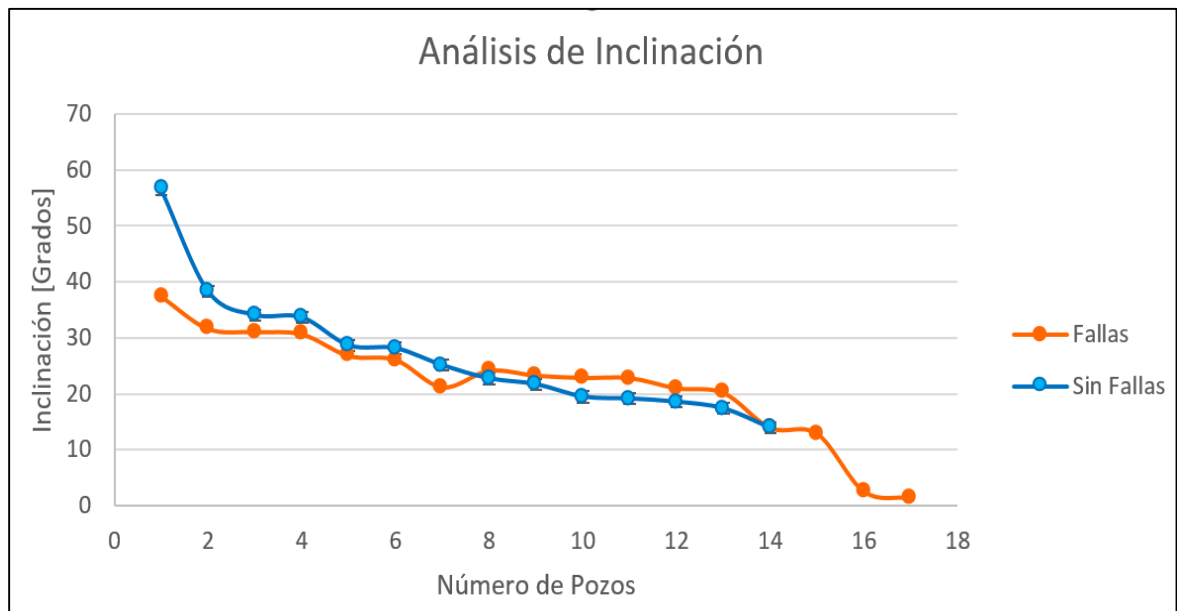


Fuente: elaboración propia.

Posteriormente, se analizaron las trayectorias de 31 pozos haciendo uso de la herramienta digital ANGVEL, para este análisis se tuvo en cuenta principalmente los valores calculados de DLS y Δ Azimut, y los ingresados por el usuario de Inclinación y Azimut. También se consideraron los reportes de instalación de los equipos BES en cada uno de ellos. Para estos análisis se ordenaron los datos respectivos de mayor a menor con el fin de facilitar su interpretación y comparación. Se realizaron tres comparaciones diferentes en aquellos pozos que presentaron fallas en el cable de potencia con aquellos que no, los resultados se muestran a continuación:

3.1.1 Inclinación. Para este análisis se revisaron los 31 pozos y se segregaron los pozos que fallaron de los que no. De cada uno de ellos se identificó el valor máximo de inclinación del pozo hasta la profundidad de asentamiento de la bomba, la cual es reportada como la profundidad del intake. Los datos que se encuentran a mayores profundidades no se tuvieron en cuenta porque el equipo no atravesó dichos tramos de la trayectoria del pozo. La gráfica muestra los resultados de la comparación de los pozos que fallaron, en color naranja, con respecto a los que no fallaron, en color azul.

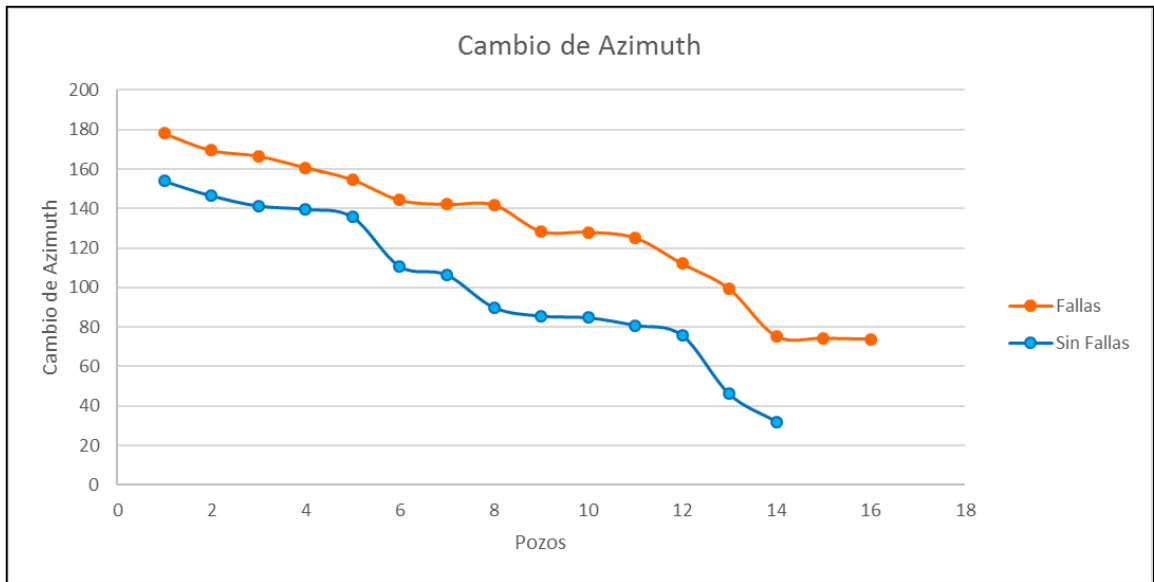
Gráfica 2. Análisis de Inclinación



Fuente: elaboración propia.

3.1.2 Cambio de azimut. Teniendo en cuenta que el ángulo de azimut varía en la componente horizontal de un plano bidimensional, se utilizó la diferencia entre dos estaciones seguidas del survey con el fin de identificar los cambios de giro que ocurren en cada intervalo de la trayectoria del pozo. Para este análisis se tomaron los valores máximos del cambio de azimut para cada uno de los pozos estudiados.

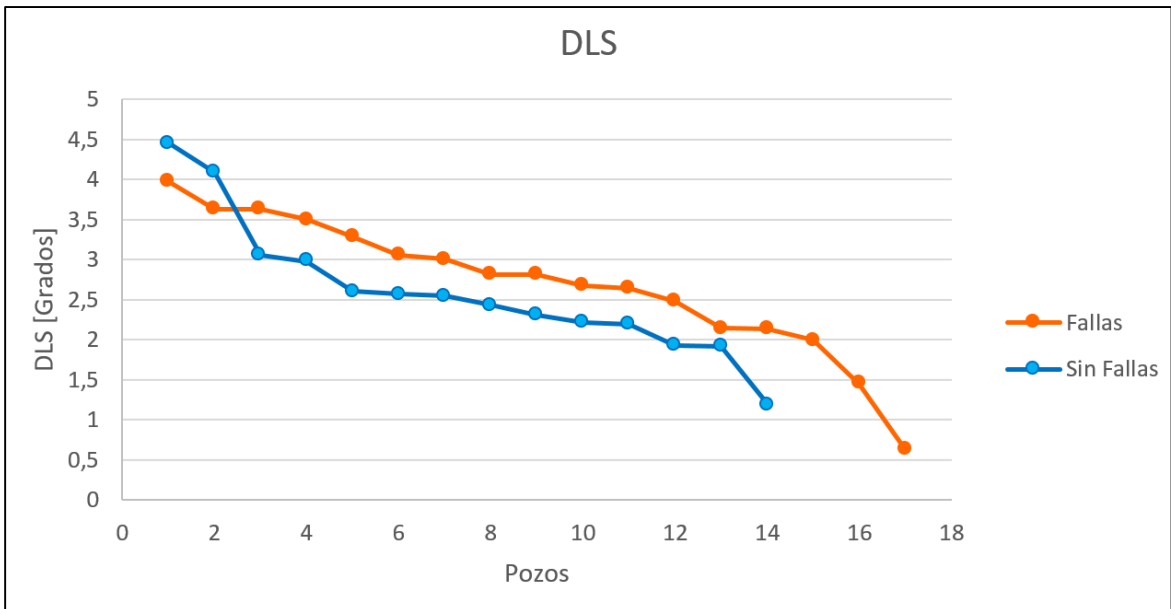
Gráfica 3. Análisis de cambio de azimut



Fuente: elaboración propia

3.1.3 DLS. en la siguiente grafica se muestran los valores máximos de DLS de cada uno de los pozos, calculados por la herramienta digital mediante el método de mínima curvatura. en color naranja se observan los pozos que tuvieron fallas en el cable de potencia y en color azul los que no presentaron fallas.

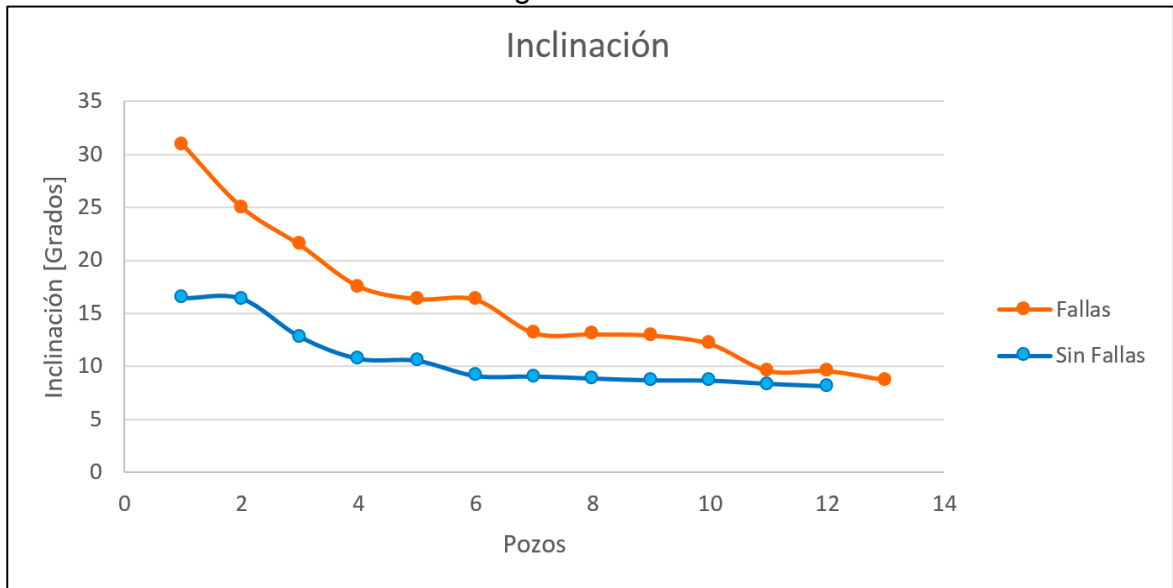
Grafica 4. Análisis de DLS



Fuente: elaboración propia

3.1.3 Inclinación teniendo en cuenta el cambio de azimut. En este caso se tomaron 25 pozos de los 31 mencionados anteriormente, los que se descartaron no cumplían con la condición de tener alguna inclinación por encima de los 8° o no presentaban variación de azimut para el rango requerido. En color naranja se muestran los pozos que presentaron fallas en el cable de potencia y en color azul los que no. Para cada pozo se filtraron sus valores de inclinación que cumplieran con la condición de estar por encima de los 8°, con este filtro se halló el valor máximo de cambio de azimut y con él se obtuvo el dato de inclinación que se reporta en la gráfica 5.

Gráfica 5. Análisis de inclinación según cambio de azimut



Fuente: elaboración propia

De los 31 pozos en estudio se analizaron los reportes de instalación de 22 de ellos, debido a que no se contó con la totalidad de la información. Teniendo en cuenta estos reportes, se encontró que existen diferentes factores por los cuales se presentan variaciones en la velocidad de bajada, entre ellos unos externos a la operación y, posiblemente, otros que se relacionen con la geometría del pozo. Fue posible observar que en varias ocasiones detuvieron la operación debido a condiciones climáticas adversas, principalmente cuando se presentaron tormentas eléctricas en la zona. Además, fue muy común ver disminuciones de velocidad cuando hubo:

- Charlas operacionales
- Tomas de medidas eléctricas y datos de sensor
- Simulacros de patada de pozo
- Empalmes
- Lluvias en la zona
- Almuerzos del personal

- Detección de gas
- Fallas en el taladro
- Cambios de turno e informes de novedades

De los reportes de instalación se obtuvieron las diferentes velocidades de bajada registradas al momento de instalar el equipo BES en cada pozo, de ellos se tomaron los datos de velocidad en juntas/hora, donde cada junta mide aproximadamente 31.25 ft. Con las velocidades se procedió a separarlas en rangos y realizar un conteo de cada valor, teniendo en cuenta los diferentes DLS que se encontraran a la profundidad correspondiente a la que bajaron con esas velocidades. A partir de estas frecuencias fue posible obtener los siguientes resultados:

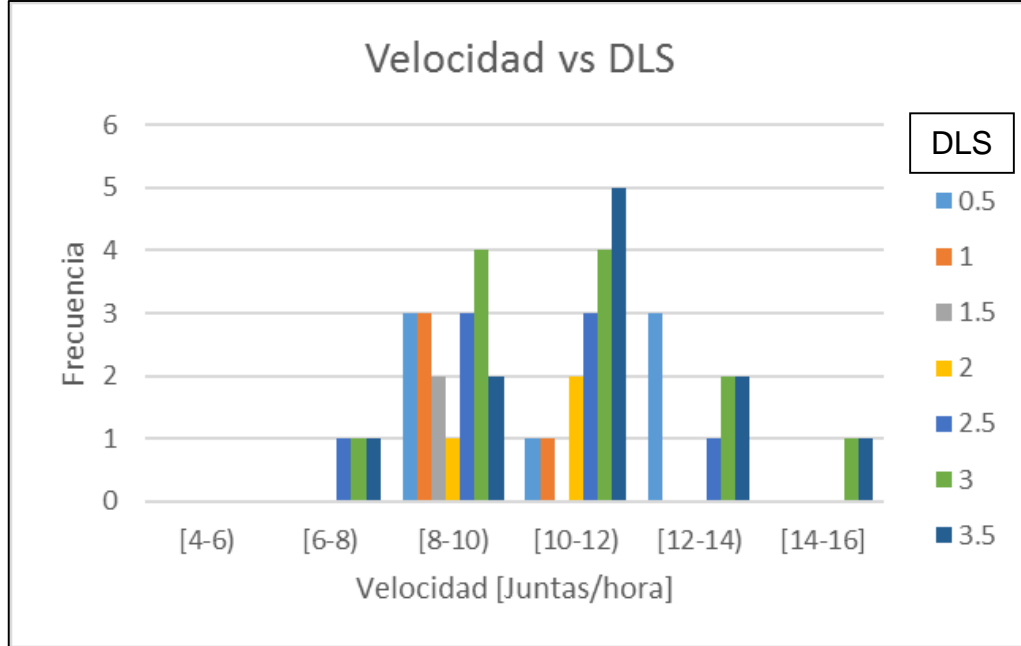
3.1.3.1 Cuando se presentaron fallas. De los 22 reportes de instalación se analizaron 13 pozos que presentaron fallas durante la instalación del equipo BES en fondo. La tabla 1 muestra las frecuencias obtenidas de los diferentes rangos de velocidades para cada valor de DLS. Los rangos de velocidades se encuentran entre 4 y 16 juntas/hora y los valores de DLS se encuentran entre 0.5 y 3.5 %/100 ft.

Tabla 1. Frecuencias de los rangos de velocidades para cada valor de DLS.

Rango de velocidades (J/h)	Valores DLS (%/100 ft)						
	0.5	1	1.5	2	2.5	3	3.5
[4-6)							
[6-8)					1	1	1
[8-10)	3	3	2	1	3	4	2
[10-12)	1	1		2	3	4	5
[12-14)	3				1	2	2
[14-16]						1	1

Fuente: elaboración propia

Gráfica 6. Frecuencias de los rangos de velocidades para cada valor de DLS.



Fuente: elaboración propia

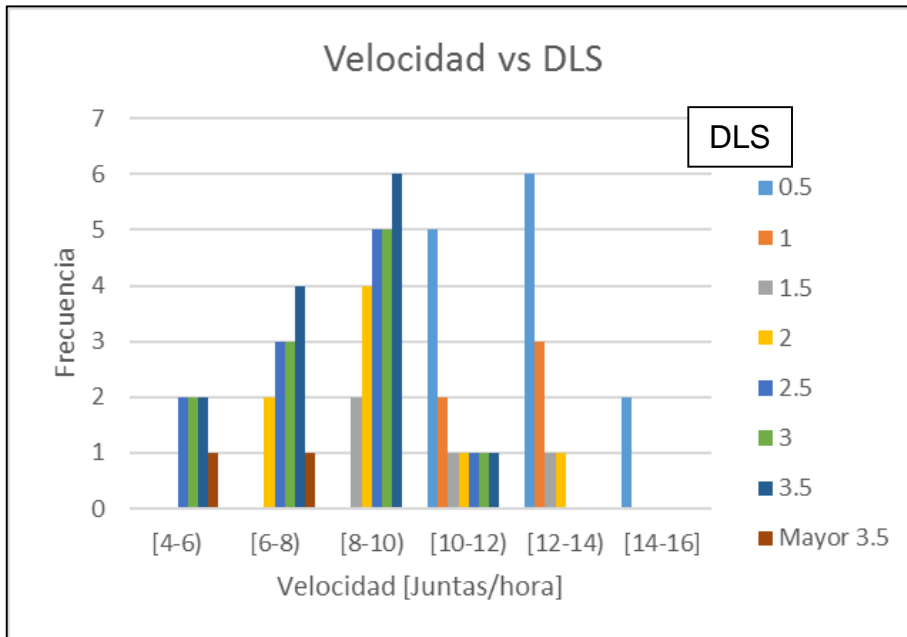
3.1.3.2 Cuando no se presentaron fallas. De los 22 reportes de instalación se analizaron los restantes 9 pozos que no presentaron fallas durante la instalación del equipo BES en fondo. La tabla 2 muestra las frecuencias obtenidas de los diferentes rangos de velocidades para cada valor de DLS. Los rangos de velocidades se encuentran entre 4 y 16 juntas/hora y los valores de DLS se encuentran entre 0.5 y mayores a 3.5 °/100 ft.

Tabla 2. Frecuencias de los rangos de velocidades para cada valor de DLS.

Rango de velocidades (J/h)	Valores DLS (°/100 ft)							
	0.5	1	1.5	2	2.5	3	3.5	Mayor 3.5
[4-6]					2	2	2	1
[6-8]				2	3	3	4	1
[8-10]			2	4	5	5	6	
[10-12]	5	2	1	1	1	1	1	
[12-14]	6	3	1	1				
[14-16]	2							

Fuente: elaboración propia

Gráfica 7. Frecuencias de los rangos de velocidades para cada valor de DLS.



Fuente: elaboración propia

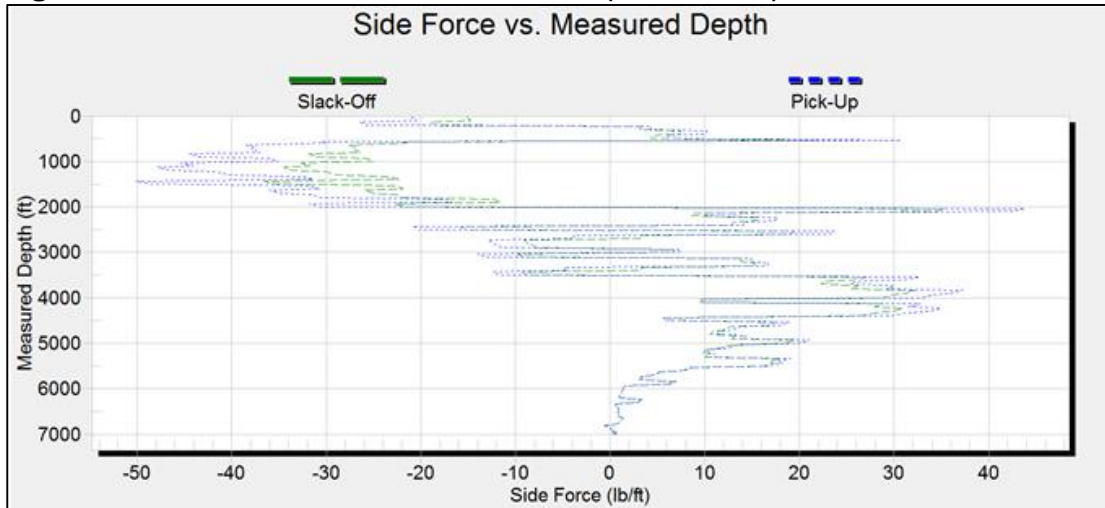
3.2 VALIDACIÓN

La validación se realizó por medio de dos softwares, el primero confidencial de uso interno de BHGE y el segundo usado por la línea de Artificial Lift, Autograph. De los pozos anteriormente estudiados y clasificados, se escogió un pozo de cada grupo, uno que presentó falla en el cable de potencia y otro que no, para cada uno se utilizaron los dos softwares y se realizó el análisis de la misma manera.

Por medio del software confidencial de uso interno de BHGE se lograron identificar los esfuerzos laterales a los que estará sometido el equipo BES durante la instalación debido a la trayectoria del pozo. Con este programa se realizaron las validaciones para ambos pozos utilizando la mayor velocidad recomendada por ANGVEL, que corresponde a 16 J/h o 500 ft/h. Estas validaciones se realizaron hasta la profundidad del intake del equipo BES

3.2.1 Pozo con falla. Los resultados obtenidos a partir del software para este pozo se muestran a continuación en las figuras 20 y 21.

Figura 12. Resultados de fuerzas laterales vs profundidad pozo con falla

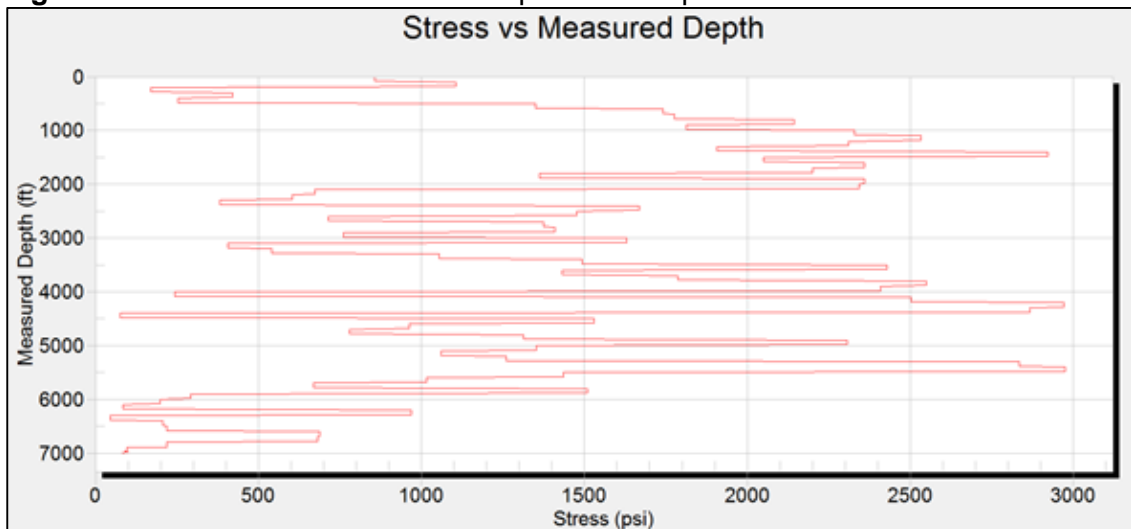


Fuente: BAKER HUGHES, software de uso interno

La figura 12 muestra los valores de fuerzas laterales en lb/ft, a los cuales estaría sometido el equipo BES durante su instalación en fondo, los valores en color verde (Slack-off) corresponden a la bajada y los azules (Pick-up) a los de subida. Se encontraron valores máximos de fuerzas laterales cercanos a las 50 lb/ft, aproximadamente entre los 1500 y los 2000 ft y se aprecian cambios abruptos en sus direcciones. Debido a que se trabaja en unidades de esfuerzo es necesario aclarar que el signo negativo hace referencia a la dirección de la fuerza sobre la herramienta, sin embargo, el valor de magnitud que presenta se debe leer en valor absoluto para su correcta interpretación.

La figura 13 muestra los valores de esfuerzos en unidades de psi obtenidos a las diferentes profundidades del pozo.

Figura 13. Resultados de esfuerzos vs profundidad pozo con falla



Fuente: BAKER HUGHES, software de uso interno

En la figura 13 se observan valores máximos cercanos a los 3000 psi a profundidades de aproximadamente 1500 ft, 4100 ft y 5400 ft, con intercalación de valores altos y bajos.

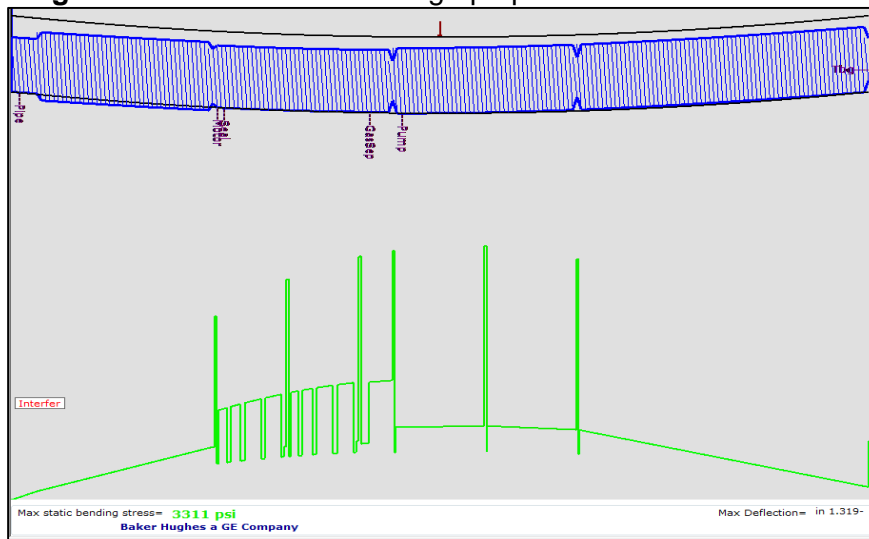
Además, con ayuda del software Autograph se utilizaron los puntos identificados por ANGVEL para los cambios de DLS de la tabla de recomendación de velocidades (Figura 24). Para este pozo se analizaron dos casos, uno que corresponde a un DLS de 1.13 °/100ft con una inclinación de 1.13° y otro con un DLS de 2.16 °/100ft con una inclinación de 11.18°. Los datos y las dimensiones del equipo BES que se trabajaron para el primer caso de este pozo se muestra en la figura 14 y los resultados obtenidos en la figura 15:

Figura 14. Datos de Autograph Pozo con Falla Caso 1

Casing ID	6.276 in
Tubing OD/ID	3.5/2.992 in
Build-up rate	1.0Deg/100ft
Well Angle	1.0 Deg from vert
ESP length	81.92 ft
=	
Equipment Description (bottom to top)	
=	
Pipe-OD/ID=4.5/1.65(in) - 2.6 (ft)	
Motor-562 SERIES /LT - 16.8 (ft)	
Seal-513 GSB DB - 6.891 (ft)	
Seal-513 GSB DB - 6.891 (ft)	
GasSep-513 GRSXINT - 3.224 (ft)	
Pump-538 PU W/O INTAKE - 8.804 (ft)	
Pump-538 PU W/O INTAKE - 8.804 (ft)	
Pump-538 PU W/O INTAKE - 27.9 (ft)	

Fuente: BAKER HUGHES, software Autograph

Figura 15. Resultados de Autograph pozo con falla caso 1



Fuente: BAKER HUGHES, software Autograph

En la figura 14 se muestran las especificaciones del equipo y del casing en el cual se realizó la validación. La figura 15 muestra un esquema del equipo BES (en azul) al interior del casing (en negro), su punto de contacto identificado por una línea vertical en la parte superior del casing, y en verde se muestran los esfuerzos de flexión a los que se somete el equipo en cada uno de sus componentes. Además, en la parte inferior identifica el valor de máximo esfuerzo de flexión, en psi, y la máxima deflexión del equipo, en pulgadas. En este caso se encontró que el máximo esfuerzo de flexión es de 3311 psi, el punto de contacto es en la bomba y la máxima deflexión es de 1.319 pulgadas.

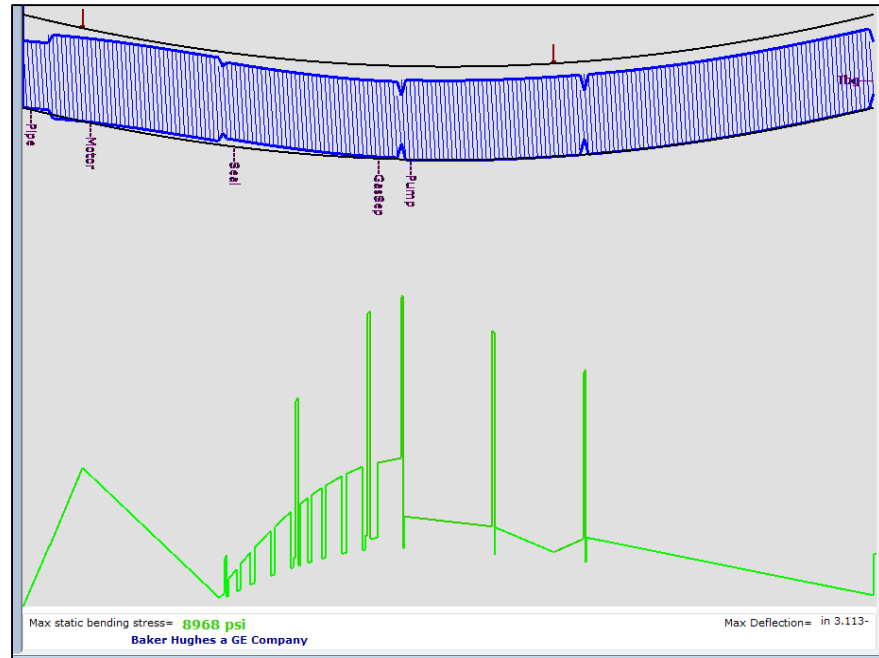
En el caso dos se realizó el mismo procedimiento, pero se identificaron dos puntos de contacto; los datos ingresados se muestran en la figura 16 y los resultados de Autograph en la figura 17.

Figura 16. Datos de Autograph Pozo con Falla Caso 2

Casing ID	6.276 in
Tubing OD/ID	3.5/2.992 in
Build-up rate	2.0Deg/100ft
Well Angle	11.0 Deg from vert
ESP length	81.92 ft
=	
Equipment Description (bottom to top)	
=	
Pipe-OD/ID=4.5/1.65(in) - 2.6 (ft)	
Motor-562 SERIES /LT - 16.8 (ft)	
Seal-513 GSB DB - 6.891 (ft)	
Seal-513 GSB DB - 6.891 (ft)	
GasSep-513 GRXINT - 3.224 (ft)	
Pump-538 PU W/O INTAKE - 8.804 (ft)	
Pump-538 PU W/O INTAKE - 8.804 (ft)	
Pump-538 PU W/O INTAKE - 27.9 (ft)	

Fuente: BAKER HUGHES, software Autograph

Figura 17. Resultados de Autograph Pozo con Falla Caso 2

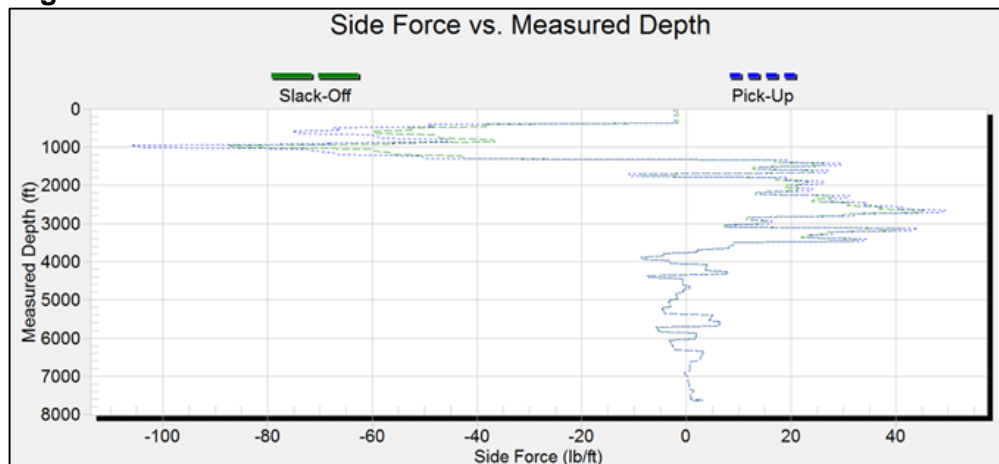


Fuente: BAKER HUGHES, software Autograph

En este caso se encontró que el máximo esfuerzo de deflexión del equipo es de 8968 psi, sus puntos de contacto fueron en la bomba y en el motor, y su máxima deflexión fue de 3.113 pulgadas.

3.2.2 Pozo sin falla. Para el primer caso se tomaron las mismas condiciones de velocidad que en el anterior pozo, y se obtuvieron los siguientes resultados del software de uso interno de BHGE, se muestran en las figuras 18 y 19. Estos resultados siguen las mismas convenciones descritas anteriormente.

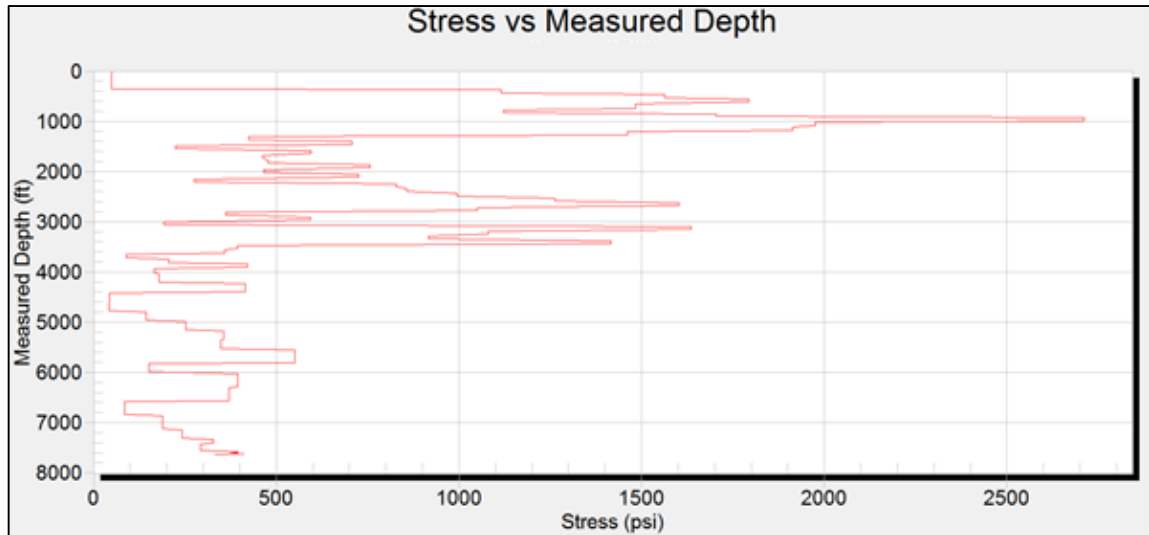
Figura 18. Resultados de Fuerzas Laterales vs Profundidad Pozo sin Falla
Side Force vs. Measured Depth



Fuente: BAKER HUGHES, software de uso interno

La figura 18 muestra un pico de valor máximo por encima de las 100 lb/ft a los 1000 ft de profundidad, con otros valores cercanos a las 40 lb/ft en dirección opuesta. Se observan cerca de 5000 ft de trayectoria del pozo con valores cercanos a cero.

Figura 19. Resultados de esfuerzos vs profundidad pozo sin falla



Fuente: BAKER HUGHES, software de uso interno

En la figura 19 se observa un pico máximo de esfuerzos a los 1000 ft de profundidad por encima de 2500 psi, otros de aproximadamente 1500 psi a los 3000 ft y también cerca de 5000 ft de trayectoria con valores de esfuerzos por debajo de los 500 psi. Posteriormente, se realizó el procedimiento descrito anteriormente con el software Autograph, se tomaron dos casos de estudio: uno con un DLS de 2.03 °/100 ft y una inclinación de 4,42° y otro con un DLS de 1.26 °/100 ft con una inclinación de 1.07°.

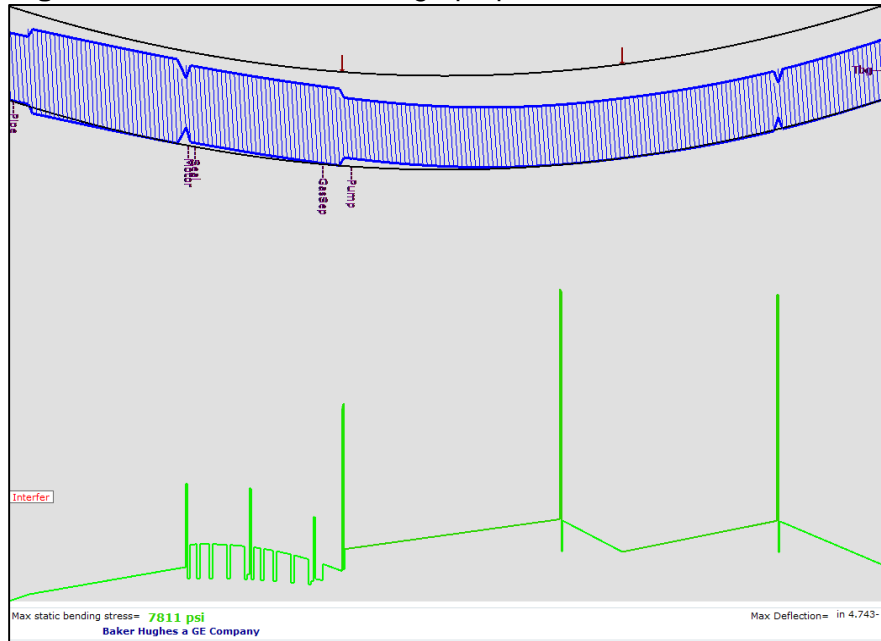
Los datos ingresados y los resultados se muestran en las figuras 20 y 21, respectivamente.

Figura 20. Datos de Autograph Pozo Sin Falla Caso 1

Casing ID	6.276 in
Tubing OD/ID	3.5/2.992 in
Build-up rate	2.0Deg/100ft
Well Angle	4.0 Deg from vert
ESP length	94.8 ft
=	
Equipment Description (bottom to top)	
=	
Pipe-OD/ID=4.5/1.65(in) - 2.6 (ft)	
Motor-562 SERIES /LT - 16.8 (ft)	
Seal-513 GSB DB - 6.891 (ft)	
Seal-513 GSB DB - 6.891 (ft)	
GasSep-513 GRS3 - 3.104 (ft)	
Pump-400 FPU W/O INTAKE - 23.5 (ft)	
Pump-400 FPU W/O INTAKE - 23.5 (ft)	
Pump-400 FPU W/O INTAKE - 11.5 (ft)	

Fuente: BAKER HUGHES, software Autograph

Figura 21. Resultados de Autograph pozo sin falla caso 1



Fuente: BAKER HUGHES, software Autograph

En este caso se encontró que el máximo esfuerzo de deflexión del equipo es de 7811 psi, sus puntos de contacto fueron en la bomba y en el separador de gas, y su máxima deflexión fue de 4.743 pulgadas.

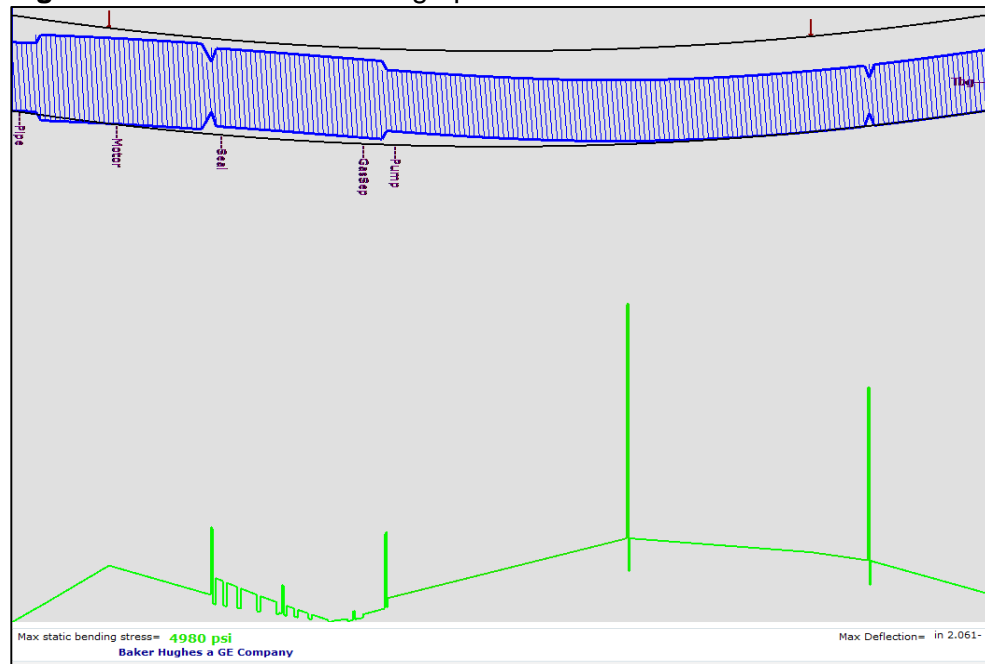
Para el caso 2 de este pozo se encontraron dos puntos de contacto, los datos ingresados y los resultados se muestran en las figuras 22 y 23, respectivamente.

Figura 22. Datos de Autograph Pozo Sin Falla Caso 2

Casing ID	6.276 in
Tubing OD/ID	3.5/2.992 in
Build-up rate	1.0Deg/100ft
Well Angle	1.0 Deg from vert
ESP length	94.8 ft
=	
Equipment Description	(bottom to top)
=	
Pipe-OD/ID=4.5/1.65(in)	- 2.6 (ft)
Motor-562 SERIES /LT	- 16.8 (ft)
Seal-513 GSB DB	- 6.891 (ft)
Seal-513 GSB DB	- 6.891 (ft)
GasSep-513 GRS3	- 3.104 (ft)
Pump-400 FPU W/O INTAKE	- 23.5 (ft)
Pump-400 FPU W/O INTAKE	- 23.5 (ft)
Pump-400 FPU W/O INTAKE	- 11.5 (ft)

Fuente: BAKER HUGHES, software Autograph

Figura 23. Resultados de Autograph Pozo Sin Falla Caso 2



Fuente: BAKER HUGHES, software Autograph

En este caso se encontró que el máximo esfuerzo de deflexión del equipo es de 4980 psi, sus puntos de contacto fueron en la bomba y en el motor, y su máxima deflexión fue de 2.061 pulgadas.

3.3 ESTUDIO FINANCIERO

Para el presente análisis se tienen los datos aproximados del costo de los equipos BES que han sido instalados en un campo durante un periodo de 3 años. Se estudiará el impacto económico en la empresa prestadora de servicios que tendría la implementación de la herramienta digital propuesta al reducir costos referentes al daño en el cable de potencia. Esto se realiza por medio de la evaluación de dos casos, en el primero se presenta un flujo de caja aproximado desde el año 2017 al año 2019 considerando los costos de garantías, el segundo caso no considera estos costos y asume un escenario en el cual no se presentan daños en el cable de potencia dentro del mismo periodo (2017 a 2019).

3.3.1 Ingresos. En la tabla 3 se presentan los ingresos de la empresa para un periodo de 3 años en un campo.

Tabla 3. Ingresos totales en 3 años para un campo

Precio equipo/pozo [USD]	Precio servicio/pozo [USD]	Numero de pozos	Total [USD]
\$250,000	\$ 20,000	33	\$ 8,910,000

Fuente: elaboración propia.

En la tabla 4 se encuentran discriminados la cantidad de equipos que fueron instalados por año junto con los ingresos anuales.

Tabla 4. Ingresos anuales

Año	2017	2018	2019
Número de equipos instalados	4	16	13
Total	\$ 1,080,000	\$ 4,320,000	\$ 3,510,000

Fuente: elaboración propia.

3.3.2 Egresos. De acuerdo con la información obtenida por BHGE, para este campo en específico se realiza un acuerdo de garantías el cual estipula que, en caso de falla por golpe en el cable, la empresa prestadora de servicios asumirá los costos de la totalidad del equipo junto con el servicio de instalación, esto corresponde a un monto aproximado de 270,000 USD.

A continuación, se presentan el número de pozos que falló en cada año y su costo asociado por garantía.

Tabla 5. Egresos por garantía

Año	2017	2018	2019
Número de pozos que presentan fallas en el cable de potencia [USD]	0	3	5
Costos por garantías [USD]	\$-	\$ 810,000	\$ 1,350,000

Fuente: elaboración propia

En la tabla 6 se muestran los porcentajes de gastos correspondientes a comercialización y administrativos estimados desde el año 2017 hasta el año 2022. El porcentaje presentado es respecto a los ingresos anuales.

Tabla 6. Gastos de comercialización y administrativos

Año	Gastos de comercialización	Gastos Administrativos
2017	5.8%	6.6%
2018	6.0%	6.1%
2019	6.2%	6.4%
2020	6.4%	6.8%
2021	6.6%	6.8%
2022	6.8%	7.0%
Impuesto	35%	

Fuente: elaboración propia basado en CASALLAS CORTEZ, Paula. CUY LARIOS, Jacobo. Evaluación Técnico-Financiera del Sistema de Levantamiento Artificial ESPCP en un Campo en el Valle Medio del Magdalena. Bogotá. 2019. Trabajo de Grado (Ingeniero de Petróleos). Fundación Universidad de América. Facultad de Ingeniería. 165, 168 p.

3.3.3 Valor presente neto para equipos con fallas en el cable de potencia.

Para el flujo de caja presentado en la tabla 7, los costos de producción se calculan considerando que son el 50% de los ingresos. se tiene en cuenta el costo asumido por la empresa por garantías debido a los equipos que presentaron fallas o golpes en el cable de potencia. la tasa de interés usada para el cálculo del VPN fue de 12% que es la establecida por la empresa.

Tabla 7. Flujo de caja para pozos con fallas en el cable de potencia

Flujo de caja para pozos con fallas en el cable de potencia			
Año	2017	2018	2019
Ingresos	\$ 1,080,000.00	\$4,320,000.00	\$ 3,510,000.00
Costos de producción	\$ 540,000.00	\$ 2,160,000.00	\$ 1,755,000.00
Gastos administrativos	\$ 71,280.00	\$ 263,520.00	\$ 224,640.00
Gastos de comercialización	\$ 62,640.00	\$ 259,200.00	\$ 217,620.00
Gastos pagos de garantías	\$ -	\$ 810,000	\$ 1,350,000
Utilidad antes de impuestos	\$ 406,080.00	\$ 827,280.00	-\$ 37,260.00
Impuestos (35%)	\$ 142,128.00	\$ 289,548.00	-\$ 13,041.00
Utilidad después impuestos	\$ 263,952.00	\$ 537,732.00	-\$ 24,219.00
VPN	\$647,109.48		

Fuente: elaboración propia

3.3.4 Valor presente neto para equipos sin fallas en el cable de potencia. En

la tabla 8 se presenta el flujo de caja considerando el caso hipotético que no se presenten fallas respecto al cable de potencia del equipo.

Tabla 8. Flujo de caja para pozos sin fallas en el cable de potencia

Flujo de caja para pozos sin fallas en el cable de potencia			
Año	2017	2018	2019
Ingresos	\$ 1,080,000.00	\$ 4,320,000.00	\$ 3,510,000.00
Costos de producción	\$ 540,000.00	\$ 2,160,000.00	\$ 1,755,000.00
Gastos administrativos	\$ 71,280.00	\$ 263,520.00	\$ 224,640.00
Gastos de comercialización	\$ 62,640.00	\$ 259,200.00	\$ 217,620.00
Utilidad antes de impuestos	\$ 406,080.00	\$ 1,637,280.00	\$ 1,312,740.00
Impuestos (35%)	\$ 142,128.00	\$ 573,048.00	\$ 459,459.00
Utilidad después impuestos	\$ 263,952.00	\$ 1,064,232.00	\$ 853,281.00
VPN	\$1,691,419.22		

Fuente: elaboración propia

3.3.5 Proyección del valor presente neto. En la tabla 9 se presenta la proyección a 3 años, teniendo en cuenta que según proyecciones de la empresa se venderán 20 equipos al año, obteniendo ingresos constantes hasta el 2022.

Tabla 9. Proyección de ventas a 3 años

Año	2020	2021	2022
Pozos instalados	20	20	20
Total	\$ 5,400,000	\$ 5,400,000	\$ 5,400,000

Fuente: elaboración propia

Tabla 10. Flujo de efectivo proyectado

Flujo de caja proyección			
Año	2020	2021	2022
Ingresos	\$ 5,400,000	\$ 5,400,000	\$ 5,400,000
Costos de producción	\$ 2,700,000	\$ 2,700,000	\$ 2,700,000
Gastos administrativos	\$ 367,200	\$ 367,200	\$ 378,000
Gastos de comercialización	\$ 345,600	\$ 356,400	\$ 367,200
Utilidad antes de impuestos	\$ 1,987,200	\$ 1,976,400	\$ 1,954,800
Impuestos	\$ 695,520	\$ 691,740	\$ 684,180
Utilidad después impuestos	\$ 1,291,680	\$ 1,284,660	\$ 1,270,620
VPN	\$3,081,811.02		

Fuente: elaboración propia

4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

De acuerdo con los resultados anteriores se realizó la siguiente interpretación y análisis de cada uno de los temas involucrados.

4.2 ANÁLISIS ESTADÍSTICO

Teniendo en cuenta la gráfica 1, es posible observar que el 55% de los cables que presentan problemas durante su instalación quedan completamente inutilizables (usado chatarra), resultando en un aumento de costos operativos al requerir un cable nuevo. Con respecto al 45% restante correspondiente a los usados operativos, también representa un aumento de costos para la empresa, aunque menor que cuando son chatarra, pues se les debe realizar mantenimiento como recortes, cambios de empalmes, reparación de armadura y capilares, entre otros.

4.2.1 Análisis de Inclinación. A partir de la gráfica 2 es posible observar que los resultados no se ajustan a una tendencia determinada ni muestran comportamientos específicos que los diferencien notablemente. Con lo cual, es posible afirmar que no se observa una dependencia directa en que la inclinación máxima del pozo repercuta en una falla en el cable de potencia del equipo BES.

4.2.2 Análisis del cambio de Azimut. De la gráfica 3 se logra observar una diferencia notoria entre las dos series de datos, donde el 100% de los pozos que fallaron presentan cambios de azimut máximos mayores que aquellos que no. Con lo cual, es posible pensar que a mayor cambio de azimut existe una mayor probabilidad que el equipo BES al instalarse en fondo presente una falla relacionada con el daño mecánico del cable de potencia.

4.2.3 Análisis del DLS. Debido a que el DLS se calcula utilizando relaciones trigonométricas que involucran los ángulos tanto de inclinación como de azimut (Ecuación 7) es pertinente realizar este análisis. De la gráfica 4 se puede reconocer que en la mayoría de los pozos que presentaron fallas en el cable de potencia del equipo BES se tienen valores de DLS mayores que en aquellos donde no se registraron fallas, a excepción de dos casos puntuales. A partir de esto, se podría pensar que, dada la relación matemática del DLS descrita anteriormente, este parámetro es fundamental para la toma de decisiones durante la instalación de los equipos BES en fondo.

4.2.4 Análisis de Inclinación y cambio de Azimuth. Dada la relación existente entre el DLS y los ángulos de inclinación y azimut, y el hecho de no haber encontrado una tendencia establecida en el análisis de inclinación, se decide realizar el presente análisis. En este caso se consideraron tanto los valores de inclinación como los de cambio de azimut de cada uno de los pozos en estudio. Se

escogió el valor de 8° de inclinación, a partir de las decisiones operativas que se han tomado en la empresa con respecto a la consideración de este parámetro. De la gráfica 5 es posible observar una tendencia notable de que los equipos BES que presentaron fallas en su cable de potencia se instalaron en pozos con inclinaciones mayores dependientes del cambio máximo de azimut, comparado con aquellos en los que no se reportaron fallas. Es posible pensar que cuando se analizan en conjunto los parámetros de inclinación y cambio de azimut se obtiene un resultado semejante al encontrado en el análisis del DLS (gráfica 4). A pesar de encontrar estas semejanzas en los resultados, no es posible identificar un valor de inclinación, azimut o DLS que permita hacer una discriminación específica de los pozos que fallan de aquellos que no, debido a que diferentes valores se encuentran en ambas categorías de los pozos.

Posteriormente, se propusieron las siguientes preguntas con el fin de soportar la investigación.

1. ¿Por qué durante la instalación del equipo BES disminuyen o aumentan la velocidad de bajada?

Se encontró que la velocidad de bajada además de verse afectada por los factores externos mencionados en el capítulo de resultados, también se puede ver influenciada por parámetros asociados la trayectoria del pozo como los ángulos de inclinación y azimut. Del mismo modo, al analizar estos ángulos que refieren a la geometría del pozo, es posible asociarlo nuevamente con el estudio del DLS a diferentes profundidades de su trayectoria.

2. ¿Cuál es la relación existente entre el aumento o la disminución de la velocidad de bajada con el DLS? ¿El DLS favorece o no la tendencia a presentar fallas en el cable de potencia de los equipos BES?

A partir de estos resultados se observa que en las profundidades donde se encontraron valores de DLS mayores a 3°/100 ft, se identifican velocidades por encima de 14 J/h, que para el caso de estudio corresponden a las mayores encontradas en los reportes de instalación. Mientras que, para el rango de velocidades menores a 6 J/h no se registra en ninguno de estos pozos. Otro aspecto para tener en cuenta es que los casos de mayores valores de DLS estudiados aparecen en todos los rangos de velocidades, con lo cual se podría pensar que al ser instalaciones de equipos con fallas no se tuvo un criterio de selección de velocidad para los distintos DLS.

Para los pozos que no registraron fallas en el cable de potencia se evidenció que, contrario a lo que se muestra en la gráfica 6, los valores de DLS por encima de 3.5°/100 ft registran velocidades de hasta 8 J/h. Según los reportes de instalación estas son las velocidades más bajas registradas, por otro lado, los menores valores de DLS (0.5°/100 ft) muestran velocidades de bajada por encima de 10 J/h, incluso es el único valor de DLS que reporta las mayores velocidades (de 14 a 16 J/h). Para los DLS mayores a 2.5 y hasta 3.5°/ 100 ft se observa que la mayor frecuencia

registrada se encuentra en el rango de velocidades desde 4 hasta menos de 10 J/h. Con esto se podría pensar que al ser instalaciones de equipos sin fallas se tomaron como parámetro los valores de DLS para la selección de la velocidad de bajada de los equipos BES.

3. ¿Cuál sería la velocidad de bajada óptima para recomendar la instalación en fondo del equipo BES?

Esta interpretación fue obtenida con base al estudio de las frecuencias analizadas anteriormente (gráficas 6 y 7) para aquellos equipos que tuvieron fallas en el cable de potencia y aquellos que no durante la instalación en fondo. Se presentan las velocidades recomendadas como un rango según el DLS de cada sección. Se debe tener en cuenta que después de la velocidad recomendada por ANGVEL, no se aconseja sobrepasar este límite, dado que una vez se atraviesa esta profundidad, el cable también pasará este punto crítico hasta la profundidad de asentamiento de la bomba. A partir del análisis anterior se encontró una manera para sintetizar los resultados y facilitar su interpretación:

Figura 24. Recomendación de la velocidad de bajada, según DLS

DLS [1°/100 FT]	Velocidad recomendada [J/h]
< 0.5	16
0.5 - 1.0	12
1.0-2.0	8.0 - 10.0
> 2.0	6.0- 8.0

Fuente: Elaboración propia

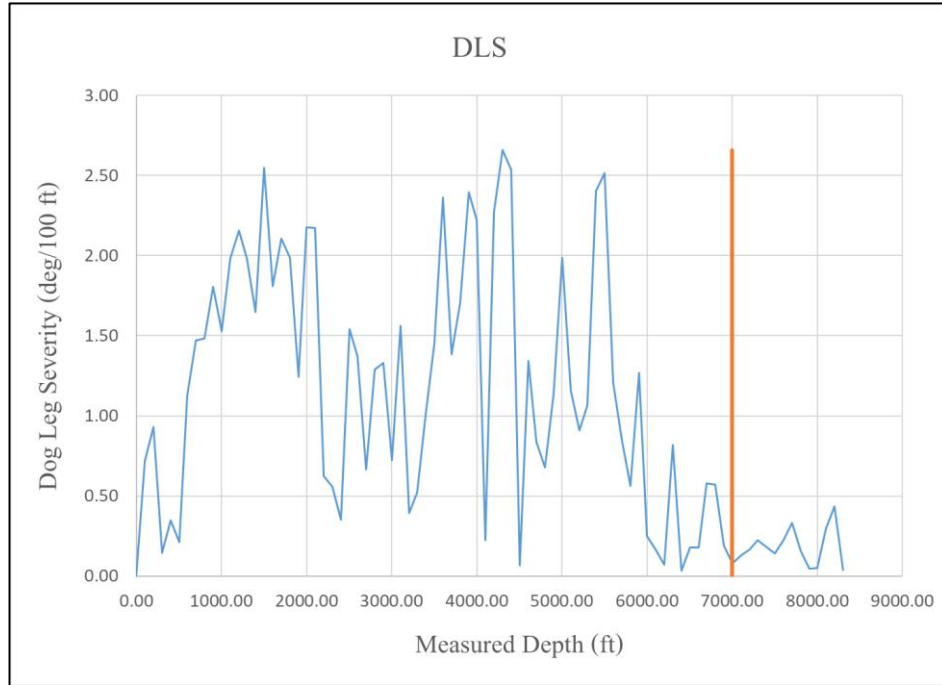
4.3 VALIDACIÓN

A continuación, se presenta el análisis de los resultados presentados para la validación del trabajo de grado.

4.3.1 Pozo con falla. De acuerdo con los resultados obtenidos del software de uso interno, representados en las figuras 12 y 13, se encontró que estas dos gráficas se correlacionaban en tanto que, a las mismas profundidades se encontraban comportamientos similares en cada uno de los parámetros involucrados. Al observar esto, se pensó en ver si había alguna relación existente de estos parámetros con el DLS, con el fin de darle mayor soporte a la investigación. La gráfica 8 muestra los

valores de DLS con respecto al MD del pozo obtenidos de ANGVEL, en naranja se marca la profundidad del intake del equipo BES.

Grafica 8. Dog Leg Severity vs Profundidad medida para el pozo con falla



Fuente: Elaboración propia, ANGVEL

Al comparar los resultados de las figuras 12 y 13 con los arrojados por ANGVEL para la gráfica de DLS (grafica 8), fue posible notar que los valores más altos de DLS que presenta el pozo corresponden a las profundidades en las que se encuentran los mayores esfuerzos y fuerzas laterales sobre la herramienta durante la instalación en fondo. Estas profundidades corresponden aproximadamente a 1500 ft, 4100 ft y 5400 ft, que son las mismas identificadas en el capítulo de resultados. Por último, es necesario tener en cuenta que operativamente los esfuerzos no deberían superar los 2500 psi, dado que internamente se maneja este valor como preventivo a un posible daño del cable de potencia, sin embargo, en este caso se supera el valor en tres ocasiones, que pueden relacionarse con el daño del cable ocurrido en este pozo.

En la figura 25 se muestra un recorte de la recomendación de velocidad dada por ANGVEL para tres puntos identificados de acuerdo con el DLS encontrado a determinada profundidad.

Figura 25. Recomendación de velocidad Pozo con Falla en el Cable de Potencia

MD (ft)	DLS (°/100 ft)	Velocities recommendation
100	0.72	During the installation of the ESP recommended velocities are: Before 100 ft ESP can go up to 16 Joints/hour Between 100 and 600 ft ESP can go up to 12 Joints/hour Between 600 and 1200 ft ESP can go up to 10 Joints/hour Over 1200 ft ESP can go up to 8 Joints/hour
600	1.13	
1200	2.16	

Fuente: Elaboración propia, ANGVEL

Teniendo en cuenta los datos obtenidos en las figuras 12 y 13 sobre los esfuerzos laterales, se puede observar que los puntos identificados por ANGVEL corresponden a esfuerzos considerables presentes al inicio de la trayectoria del pozo. En este caso, no necesariamente corresponden con los valores más altos de DLS, sino con el primer valor encontrado para cada uno de los rangos otorgados por la herramienta ANGVEL. Así, es posible recomendar que la velocidad de bajada debe ser menor cuando el equipo esté atravesando las profundidades que tengan valores altos de esfuerzos y fuerzas laterales. De esta manera se realiza la validación de ANGVEL, teniendo en cuenta que al ser correspondientes los resultados, se puede suministrar al operador de campo las velocidades de bajada según el DLS, a partir de un estudio apoyado de las fuerzas laterales y esfuerzos a los que será sometido el equipo en su bajada.

A partir de estos resultados se realizó un cálculo de la fuerza (Ecuación 16) que debe soportar el cable en caso de encontrarse por debajo de alguna de las piezas que componen el equipo BES, y que hayan sido identificados como puntos de contacto por Autograph. Los parámetros de Bending Stress, deflexión e inercia fueron obtenidos del software, el ángulo fue calculado según la figura 11 y el peso y la longitud se obtuvieron del reporte de instalación de ese equipo.

Para el análisis de los casos descritos en el capítulo de resultados se muestran los cálculos a continuación:

Tabla 11. Cálculo de fuerza pozo con falla caso 1

POZO	Bend.Stress (Lbf/in ²)	Long (in)	Defl (in)	Ángulo (rad)	Inercia (in ⁴)	Fuerza (Lbf)	Peso (Lbf)	TOTAL (Lbf)	Punto de contacto
PCF1_C1	3311	105.65	1.319	0.012	22.3	529.90	242	771.90	Bomba

Fuente: Elaboración propia

Tabla 12. Cálculo de fuerza pozo con falla caso 2

POZO	Bend.Stress (Lbf/in ²)	Long (in)	Defl (in)	Ángulo (rad)	Inercia (in ⁴)	Fuerza (Lbf)	Peso (Lbf)	TOTAL (Lbf)	Punto de contacto
PCF2_C1	8968	194.16	3.113	0.016	23.5	348.72	1360	1708.72	Motor
PCF2_C2	8968	334.8	3.113	0.009	30.47	262.19	705	967.19	Bomba

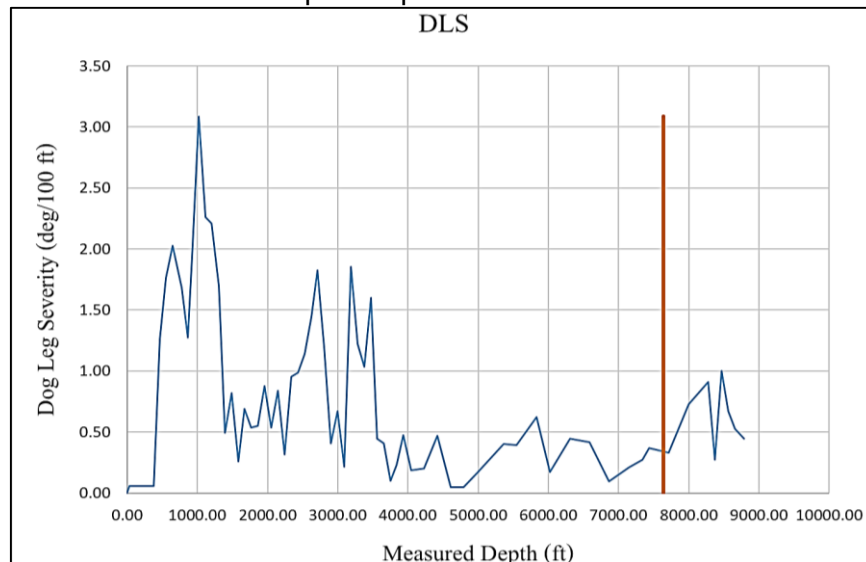
Fuente: Elaboración propia

A partir de estos resultados fue posible identificar que la menor cantidad de fuerza total se reconoce en el caso 1, que coincide con ser el de menor DLS y menor inclinación entre los dos casos analizados. Por parámetros internos en la empresa se considera que el cable puede soportar un máximo de 5000 lbf antes de romperse totalmente, por lo tanto, entre más cerca esté la fuerza total a este valor, se asume que más daño está sufriendo el cable en estos puntos de contacto.

Al analizar en conjunto la trayectoria del pozo, los valores de DLS y la fuerza total que debería soportar el cable de potencia en los puntos identificados por ANGVEL, se encontró que en ellos es más factible la aparición de algún daño en el cable de potencia, lo que refuerza la recomendación de disminución de velocidad al pasar por estos puntos.

4.3.2 Pozo sin falla. Considerando la misma suposición de la relación existente entre los esfuerzos, las fuerzas laterales y el DLS planteada en el pozo con falla, se realizó este mismo análisis para el pozo sin falla. La gráfica 9 muestra los valores de DLS según el MD del pozo.

Gráfica 9. DLS vs MD para el pozo sin falla



Fuente: Elaboración propia, ANGVEL

Del mismo modo en que se analizó el pozo con falla, se encontró que los valores máximos de fuerzas laterales y esfuerzos en este pozo son correspondientes con los valores de DLS mayores en la trayectoria del pozo, que se encuentran a 1000 ft y cerca de los 3000 ft. También, cuando el DLS presentó valores por debajo de 0.5°/100 ft hasta antes del intake de la bomba se pudo observar que las fuerzas laterales tenían valores cercanos a cero lbf/ft y los esfuerzos menores a 500 psi. En este caso solo superó el valor de 2500 psi en un punto de la trayectoria, de modo

que el cable pudo presentar riesgo a esa profundidad y, posiblemente, algún daño menor en el mismo.

Figura 26. Recomendación de velocidad Pozo Sin Falla en el Cable de Potencia

MD (ft)	DLS (°/100 ft)	Velocities recommendation
466	1.26	During the installation of the ESP recommended velocities are: Before 466 ft ESP can go up to 16 Joints/hour Between 466 and 466 ft ESP can go up to 12 Joints/hour Between 466 and 648 ft ESP can go up to 10 Joints/hour Over 648 ft ESP can go up to 8 Joints/hour
466	1.26	
648	2.03	

Fuente: Elaboracion propia, ANGVEL

En la figura 31 se determinan dos puntos en profundidad para dar una recomendación de la velocidad de bajada del equipo, se observa que las profundidades no concuerdan con los DLS mayores identificados anteriormente, sin embargo, a partir de 648 pies de profundidad medida se ha recomendado la disminución de velocidad, asegurando su menor rango en los puntos de mayor esfuerzo y fuerzas laterales.

Tabla 13. Cálculo de fuerza pozo sin falla caso 1

POZO	Bend.Stress (Lbf/in ²)	Long (in)	Defl (in)	Ángulo (rad)	Inercia (in ⁴)	Fuerza (Lbf)	Peso (Lbf)	TOTAL (Lbf)	Punto de contacto
PSF1_C1	7811	37.248	4.743	0.127	14.1	628.44	260	888.44	Separador de gas
PSF2_C2	4980	201.6	2.061	0.010	23.5	281.68	1360	1641.68	Motor

Fuente: Elaboración propia

Tabla 14. Cálculo de fuerza pozo sin falla caso 2

POZO	Bend.Stress (Lbf/in ²)	Long (in)	Defl (in)	Ángulo (rad)	Inercia (in ⁴)	Fuerza (Lbf)	Peso (Lbf)	TOTAL (Lbf)	Punto de contacto
PSF1_C1	7812	420	4.743	0.011	6.25	24.51	1070	1094.51	Bomba
PSF2_C2	4980	138	2.061	0.015	6.064	106.19	365	471.19	Bomba

Fuente: Elaboración propia

A partir de los cálculos de fuerzas totales fue posible reconocer que cuando el cable se encuentra sobre las partes más pesadas del equipo BES, tiene una mayor fuerza que soportar, además, estas partes al mismo tiempo son las de mayor dimensión, por esto los puntos de contacto en el motor son los que deben soportar más fuerza y los que están sobre la bomba, los menores. Adicionalmente, se puede observar que en los puntos donde el Bending Stress fue el más alto, corresponden con el mayor valor de fuerza soportada encontrado en el segundo caso del pozo con falla, sin embargo, esto no se presenta como tendencia, pues no en todos los casos corresponde una relación directa entre Bending Stress y fuerza soportada. Otro

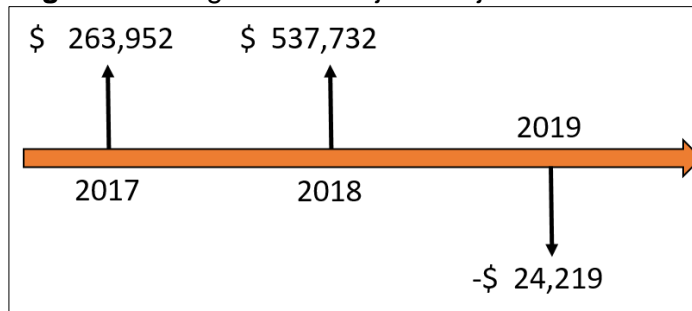
aspecto importante es que los valores de inercia más altos se reportaron en el pozo con falla, lo cual podría sugerir alguna relación entre la fuerza asociada con la flexión del equipo con esta propiedad.

4.4 ANÁLISIS FINANCIERO

A continuación, se presenta el análisis de los resultados presentados para el análisis financiero del trabajo de grado.

4.4.1 Análisis financiero de equipos con fallas. El resultado del VPN arroja un valor positivo de \$647,109.48, lo que significa que la empresa no generó pérdidas durante el período estudiado de estos tres años. Sin embargo, el flujo de caja correspondiente al año 2019 es negativo esto se debe principalmente a los gastos por garantías de ese año.

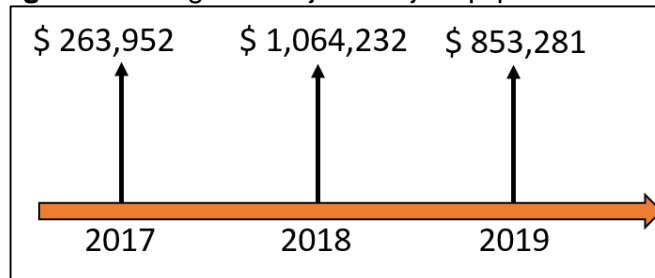
Figura 27. Diagrama del flujo de caja



Fuente: Elaboración propia

4.4.2 Análisis financiero de equipos sin fallas. El resultado del VPN arroja un valor positivo de \$1,691,419.22, lo que significa que la empresa no generó pérdidas durante el período estudiado de estos tres años. Al comparar estos dos resultados de VPN es posible notar que, a pesar de que ambos son positivos, hay una diferencia de \$1,044,309.74 favorable al VPN del análisis de los equipos que no fallaron. Esto sugiere que, al no presentar fallas en el cable de potencia, la empresa logra generar una disminución de costos del 62%.

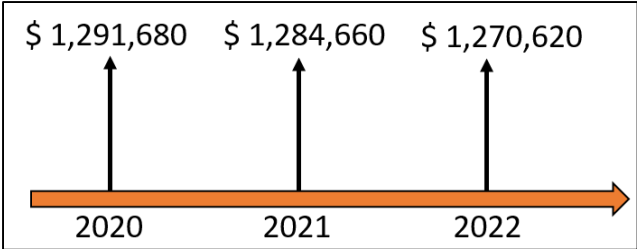
Figura 28. Diagrama flujo de caja equipos sin fallas



Fuente: Elaboración propia

4.4.3 Proyección a tres años. Para la proyección interna de la empresa de ventas correspondientes a 20 equipos anuales, se observa que el flujo de caja para los próximos tres años arroja valores positivos, por ende, el resultado del VPN es \$3,081,811.02, sin asumir gastos operativos por pagos de garantías.

Figura 29. Diagrama de flujo de proyección



Fuente: Elaboración propia

Es necesario tener en cuenta que el análisis financiero presentado solamente tiene en cuenta el pago por garantías cuando se presentan golpes o daños en el cable de potencia, no se consideraron otro tipo de daños en los equipos BES que puedan generar costos adicionales durante la operación y alterar los resultados del VPN calculado.

5. CONCLUSIONES

- Con el estudio de un survey es posible conocer la geometría de un pozo, y sus variaciones de ángulos de inclinación y azimut conforme avanza su trayectoria en profundidad, permitiendo un análisis más detallado para planear una mejor instalación del equipo BES en fondo.
- El 55% de los cables de potencia analizados en el presente trabajo quedan completamente inoperativos (usado chatarra), que desemboca en aumento de costos para las empresas.
- Analizar los ángulos de inclinación y azimut por separado, no arroja resultados concluyentes al no ser un valor representativo, mientras que, cuando se analizan en conjunto es posible identificar una tendencia para su estudio.
- Cuando se realizó el filtro de pozos con inclinaciones mayores a 8° con su respectivo máximo cambio de azimut se observó un comportamiento donde los que fallaron presentan valores por encima de aquellos que no, acorde con el observado para el DLS.
- El aumento o disminución de la velocidad de bajada no siempre depende de las condiciones de pozo, también está sujeto a factores externos, como climáticos, por ejemplo, durante la operación.
- El DLS no es el único factor determinante de la tendencia a presentar fallas durante la instalación de los equipos BES, debe ser analizado en conjunto con la velocidad de bajada.
- Es necesario dar un rango de velocidad de bajada recomendado, que varía entre 6 y 16 J/h, según los diferentes valores de DLS encontrados a lo largo de la trayectoria del pozo.
- Los puntos críticos encontrados en la trayectoria del pozo presentan una relación directa con los mayores valores de DLS, las fuerzas laterales y los esfuerzos presentes.
- Los mayores valores de fuerza que debe soportar el cable se obtienen cuando se encuentra ubicado por debajo del motor, debido al peso de esta parte y al esfuerzo de flexión del equipo.
- La implementación del proyecto es viable desde el punto de vista económico debido a que, según el análisis financiero, se reducirían en un 62 % los costos por pagos de garantías debido a golpes en el cable de potencia.

6. RECOMENDACIONES

- Realizar un análisis más exhaustivo para el cálculo de DL cuando se cuenta con archivos de gyro tomados pie a pie, teniendo en cuenta que nuestra herramienta digital funciona adecuadamente para datos tomados por un survey cada 100 pies.
- Realizar el mismo estudio para los valores de DLS por encima de 3.5 °/100 ft, teniendo en cuenta que en el presente trabajo se realizó hasta ese rango.
- Para tener una visión más aproximada respecto al daño que podría tener el equipo BES en su totalidad se recomienda realizar un estudio que incluya el parámetro de flexión o curvatura que puede presentar durante su instalación en fondo.
- Analizar el efecto que tiene el momento de inercia de cada componente del equipo BES sobre las fallas del cable de potencia.

BIBLIOGRAFÍA

BAKER HUGHES. Submersible Pump Handbook. 11 Edición. Claremore. Baker Hughes 2014.

ESP OIL INTERNATIONAL TRAINING GROUP. (2004: Venezuela) Bombeo Electrosumergible: Análisis, Diseño, Optimización y Trouble Shooting, 2004.

HALLIBURTON. Wellbore Surveying.[en línea].<<https://www.halliburton.com/en-US/ps/sperry/drilling/measurement-while-drilling/wellbore-surveying/default.html#targetText=Wellbore%20Surveying,path%20in%20three%2Ddimensional%20space.>>

HOLLUND BS. Artificial Lift – Electrical Submerged Pump, Best Practice and Future Demands Within Subsea Applications. Stavanger City. University of Stavanger. 2010

INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN. Compendio de normas para trabajos escritos. NTC.1486-6166. Bogotá D.C: El instituto, 2018.

MITCHEL Robert, MISKA Stefan. Fundamentals of Drilling Engineering. Vol 12. Texas: SPE, 2011. 451 p.

BUSTAMANTE VILLAMAR, Daniel. Metodología para el Desarrollo de un Programa de Computo para el Diseño de Bombeo Electrosumergible y su Aplicación. Guayaquil, 2007. Trabajo de grado (Ingeniero en Petróleos). Escuela Superior Politécnica del Litoral. Facultad de Ingeniería en Ciencias de la Tierra.



NEUROTH, Heike. Design Features of Improved Electric Submersible Pump Cable To Withstand Installation and Service Conditions. Texas. 1985

VELASQUEZ GOMEZ, Eduardo. CAMACHO, Eliodoro. Perforación Direccional. [en línea]. <https://issuu.com/ingenierocarlosmariocortez/docs/perfo_direccional>

ANEXOS

Anexo A.

RECORTE DE PANTALLA DE ANGVEL, HOJA WELCOME

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J										
1	<h1>ANGVEL</h1> <p>ESP INSTALLATION</p> 																			
2											DESIGNED BY					SPONSORED BY				
3											<p>CARLOS FABIÁN SÁNCHEZ SUÁREZ & CAMILA ANDREA RUBIO CABALLERO</p>									
4																				
5																				
6																				
7																				
8																				
9																				
10																				
11																				
12																				
13																				
14																				
15																				
16																				
17																				
18																				
19																				
20																				
21																				
22																				
23																				
24																				

Fuente: elaboración propia.

Anexo B.

RECORTE DE PANTALLA DE ANGVEL, HOJA INSTRUCTIONS

	A	B	C	
1	INSTRUCTIONS		INSTRUCCIONES	
2				
3	Following, instructions that must be considered for a correct use of this tool (Calculations Sheet)		A continuación, instrucciones que deben ser consideradas para el uso adecuado de esta herramienta (Hoja Calculations)	
4				
5				
6	1. Click on the "Clear" button		1. Hacer click en el botón "Clear"	
7	2. User must introduce MD (ft), Inclination (deg) and Azimuth (deg) data, obtained from		2. El usuario deberá introducir los datos de MD (pies), Inclination (grados) y Azimuth (grados) obtenidos	
8	SURVEY of the well supposed to be analyzed or perform the installation of BES equipment		del SURVEY del pozo que desee analizar o realizar la instalación del equipo BES.	
9	3. User can modify the vertical section azimuth angle to rotate the well trajectory as they		3. Podrá modificar el ángulo de azimuth de la sección vertical que desee para observar la	
10	want		trayectoria del pozo.	
11	4. User must add the ESP Intake installation depth and click on the button "Show Intake"		4. El usuario deberá agregar la profundidad de instalación del intake de la bomba y hacer click en el botón	
12	once this data is introduced		"Show Intake" una vez ingresados los datos.	
13	5. After this, user must locate the last cell which contains data in the MD column, with this		5. Una vez introducidos los datos deberá ubicar la última celda que almacene un dato en la columna de MD,	
14	has to go to "Trajectory" sheet and modify graph ranges in the upper bar, seeking to have		con este dato dirigirse a la hoja "Trajectory" y modificar los rangos del gráfico en la barra superior	
15	the same range, from file 10 to the last one with MD data (in this case 114).		de modo que queden con el mismo rango, desde la fila 10 hasta la última con dato de MD (en este caso 114).	
16				
17				
18	6. Select the orange line and do the same procedure as 4, now with the las data of the		6. Seleccionar en la línea naranja y realizar este mismo procedimiento, pero ahora con el último dato de	
19	MD Up to Intake column (in this case 91)		la columna MD Up to Intake (en este caso 91)	
20				
21				
22				
23	To determine the angle (Angle Sheet)		Para determinar el ángulo (Hoja Angle)	
24				
25	Only verify that the "Show Intake" button had been clicked on the Calculations Sheet		Solo es necesario verificar que en la hoja Calculations se haya hecho click en el botón "Show Intake"	
26				
27	To do determine the rate of descent (Velocity Sheet)		Para determinar la velocidad de bajada (Hoja Velocity)	
28				
29	1. Verify that the "Show Intake" button had been clicked int he Calculations Sheet		1. Verificar que en la hoja Calculations se haya hecho click en el botón "Show Intake"	
30	2. Click on the "Calculate" button		2. Hacer click en el botón "Calculate"	
31				
32	BUTTONS		BOTONES	
33				
34	CLEAR: Deletes information in MD, Azimuth and Inclination columns		CLEAR: Borra la información contenida en las columnas de MD, Inclination y Azimuth	
35	SHOW ALL: Shows all the calculations developed		SHOW ALL: Muestra todos los cálculos realizados	
36	SHOW INTAKE: Shows calculations up to ESP Intake depth		SHOW INTAKE: Muestra los cálculos hasta la profundidad del Intake del equipo BES	
37	HIDE: Shows a Traditional Survey		HIDE: Muestra un Survey tradicional	
38	CLEAR VELOCITY: Deletes the results obtained in Velocity Sheet		CLEAR VELOCITY: Borra los resultados obtenidos en la hoja Velocity	
39	CALCULATE: develops all calculations required and shows the recommended speed		CALCULATE: Realiza los cálculos requeridos y muestra la velocidad recomendada	
40				

Fuente: elaboración propia

Anexo C.

RECORTE DE PANTALLA DE ANGVEL, HOJA CALCULATIONS

	A	B	C	H	J	K	M	T	X	AA	AB	AC	AD	AE	AF	AG	AH	AI	AJ	AK	AL	A
1																						
2																						
3			V. Section Azimuth (deg)	45.00		Clear							ShowAll									
4			ESP Intake depth (ft)	7636.12		Hide							Show Intake									
5																						
6																						
7																						
8		MD	Inclination	Azimuth	TYD	North	East	DLS	V. Section Δ	Azimuth												
9		(ft)	(deg)	(deg)	(ft)	(ft)	(ft)	(deg/100ft)	(ft)	(deg)												
10		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00												
11		35.00	0.02	224.51	35.00	0.00	0.00	0.06	-0.01	135.49												
12		376.00	0.21	224.51	376.00	-0.49	-0.48	0.06	-0.69	0.00												
13		466.00	1.07	326.71	466.99	0.09	-1.06	1.26	-0.68	102.20												
14		555.00	2.55	344.92	554.95	2.70	-2.03	1.76	0.47	18.21												
15		648.00	4.42	348.62	647.77	8.21	-3.28	2.03	3.49	3.70												
16		773.00	6.47	344.09	772.20	19.71	-6.16	1.68	9.58	4.53												
17		862.00	6.70	334.45	860.62	29.21	-9.77	1.28	13.75	9.64												
18		925.00	6.83	324.21	923.18	35.57	-13.55	1.94	15.57	10.24												
19		1017.00	8.63	307.96	1014.35	44.25	-22.19	3.09	15.60	16.25												
20		1112.00	10.74	306.85	1107.99	53.95	-34.90	2.26	13.47	1.11												
21		1206.00	12.75	308.29	1200.02	65.63	-50.05	2.21	11.02	1.44												
22		1302.00	13.87	313.16	1293.44	80.07	-66.76	1.70	9.41	4.87												
23		1395.00	13.70	314.89	1383.76	95.46	-82.69	0.49	9.03	1.73												
24		1488.00	13.30	312.21	1474.20	110.42	-98.42	0.82	8.49	2.68												
25		1581.00	13.09	312.67	1564.74	124.75	-114.08	0.26	7.54	0.46												
26		1674.00	12.48	313.30	1655.43	138.78	-129.14	0.69	6.81	0.63												
27		1770.00	12.93	312.28	1749.08	153.12	-144.63	0.54	6.00	1.02												
28		1865.00	12.75	310.13	1841.71	167.02	-160.51	0.55	4.60	2.15												
29		1959.00	12.71	313.77	1933.40	180.86	-175.91	0.88	3.50	3.64												
30		2053.00	12.25	314.59	2025.18	195.02	-190.48	0.54	3.21	0.82												
31		2147.00	12.26	318.22	2117.04	209.46	-204.23	0.84	3.70	3.63												
32		2241.00	11.98	317.81	2208.94	224.13	-217.43	0.32	4.74	0.41												
33		2336.00	11.14	319.25	2302.01	238.39	-230.05	0.95	5.90	1.44												
34		2430.00	11.05	314.55	2394.26	251.59	-242.39	0.99	6.50	4.70												
35		2525.00	10.08	312.13	2487.65	263.55	-255.05	1.14	6.01	2.42												
36		2620.00	8.85	308.69	2581.35	273.70	-266.92	1.44	4.79	3.44												
37		2715.00	7.26	313.35	2675.41	282.39	-276.99	1.83	3.82	4.66												
38		2810.00	6.15	311.66	2769.76	289.89	-285.16	1.19	3.35	1.69												
39		2905.00	5.81	313.43	2864.25	296.58	-292.45	0.41	2.92	1.77												
40		3000.00	5.77	307.14	2958.76	302.77	-299.75	0.67	2.14	6.29												
41		3095.00	5.57	307.64	3053.30	308.47	-307.21	0.22	0.89	0.50												
42		3189.00	4.06	317.98	3146.97	313.72	-313.05	1.85	0.48	10.34												
43		3283.00	3.12	328.57	3240.78	318.38	-316.61	1.22	1.25	10.59												
44		3375.00	2.18	331.96	3332.68	322.06	-319.74	1.04	2.35	3.39												
45		3470.00	0.85	3.13	3427.65	324.36	-319.55	1.60	3.40	31.17												
46		3563.00	0.77	32.24	3520.64	325.58	-319.18	0.45	4.53	29.11												

Fuente: elaboración propia

Anexo D.

RECORTE DE PANTALLA DE ANGVEL, HOJA ANGLE

A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O
MD Up to intake (ft)	Azimuth Up to intake (deg)	Range		Count	Location		Preferred azimuth angle				Last MD up to intake	Azimuth		
0	0	1		4	1						7433	128.67		
35.00000068	224.51	8		3	2									
376	224.51	8		0	3		Location	Between			Between			
466	326.71	11		2	4		11	315	345		113.67	143.67		
555	344.92	12		6	5		NA	NA			NA	NA		
648	348.62	12		0	6									
773	344.09	12		2	7		Decision #1				Decision #2			
862	334.45	12		5	8		ESP cable should be located				ESP cable should be located			
925	324.21	11		2	9		Between 315° AND 345°				Between 113.67° AND 143.67°			
1017	307.96	11		0	10		Considering the azimuth changes				Considering the intake position of the pump			
1112	306.85	11		27	11									
1206	308.29	11		7	12									
1302	313.16	11												
1395	314.89	11												
1488	312.21	11												
1581	312.67	11												
1674	313.3	11												
1770	312.28	11												
1865	310.13	11												
1959	313.77	11												
2053	314.59	11												
2147	318.22	11												
2241	317.81	11												
2336	319.25	11												
2430	314.55	11												
2525	312.13	11												
2620	308.69	11												
2715	313.35	11												
2810	311.66	11												
2905	313.43	11												
3000	307.14	11												
3095	307.64	11												
3189	317.98	11												
3283	328.57	11												
3375	331.96	12												
3470	3.13	1												
3563	32.24	2												

LOCATION

WELCOME | Instructions | Calculations | **Angle** | Velocity | Trajectory | Plan view | Inclination | Azimuth | DLS

Fuente: elaboración propia

Anexo E.

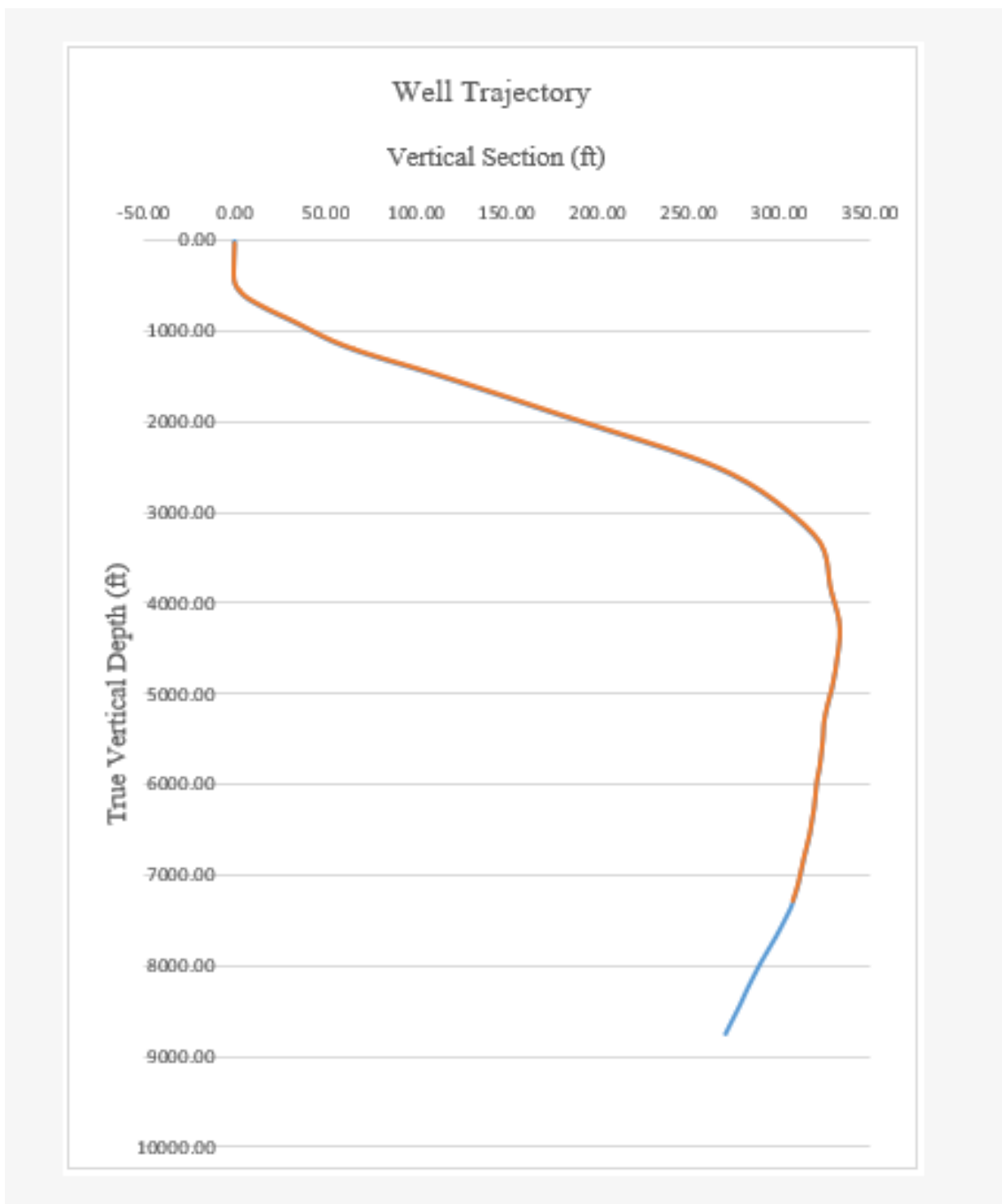
RECORTE DE PANTALLA DE ANGVEL, HOJA VELOCITY

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L										
1	MD Up to intake	DLS up to intake																				
2	(ft)	(deg/100ft)																				
3	0	0.00		MD (ft)	DLS (°/100 ft)		Velocities recommendation															
4	35.00000068	0.06					During the installation of the ESP recommended velocities are: Before 466 ft ESP can go up to 16 Joints/hour Between 466 and 466 ft ESP can go up to 12 Joints/hour Between 466 and 648 ft ESP can go up to 10 Joints/hour Over 648 ft ESP can go up to 8 Joints/hour															
5	376	0.06		466	1.25909692																	
6	466	1.26		466	1.25909692																	
7	555	1.76		648	2.02803882																	
8	648	2.03					Otherwise, you can consider the following scheme															
9	773	1.68																				
10	862	1.28		Clear Velocity			<table border="1"> <thead> <tr> <th>DLS [1°/100 FT]</th> <th>Velocidad recomendada [J/h]</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>< 0.5</td> <td>16</td> </tr> <tr> <td>0.5 - 1.0</td> <td>12</td> </tr> <tr> <td>1.0-2.0</td> <td>8.0 - 10.0</td> </tr> <tr> <td>> 2.0</td> <td>6.0- 8.0</td> </tr> </tbody> </table>						DLS [1°/100 FT]	Velocidad recomendada [J/h]	< 0.5	16	0.5 - 1.0	12	1.0-2.0	8.0 - 10.0	> 2.0	6.0- 8.0
DLS [1°/100 FT]	Velocidad recomendada [J/h]																					
< 0.5	16																					
0.5 - 1.0	12																					
1.0-2.0	8.0 - 10.0																					
> 2.0	6.0- 8.0																					
11	925	1.94		Calculate																		
12	1017	3.09																				
13	1112	2.26																				
14	1206	2.21																				
15	1302	1.70																				
16	1395	0.49																				
17	1488	0.82																				
18	1581	0.26																				
19	1674	0.69																				
20	1770	0.54																				
21	1865	0.55																				
22	1959	0.88																				
23	2053	0.54																				
24	2147	0.84																				
25	2241	0.32																				
26	2336	0.95																				
27	2430	0.99																				
28	2525	1.14																				
29	2620	1.44																				
30	2715	1.83																				

Fuente: elaboración propia

Anexo F.

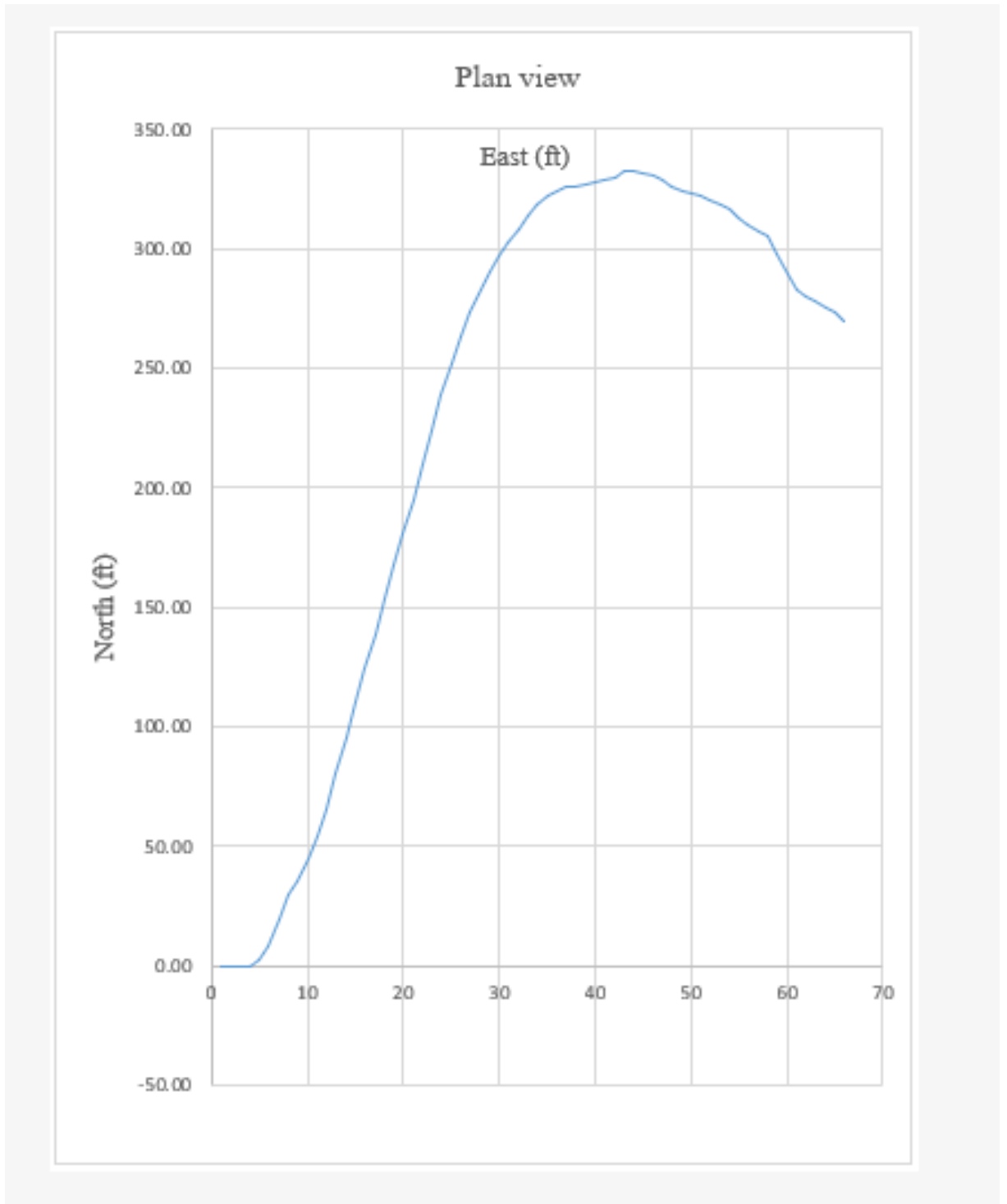
RECORTE DE PANTALLA DE ANGVEL, HOJA TRAJECTORY



Fuente: elaboración propia

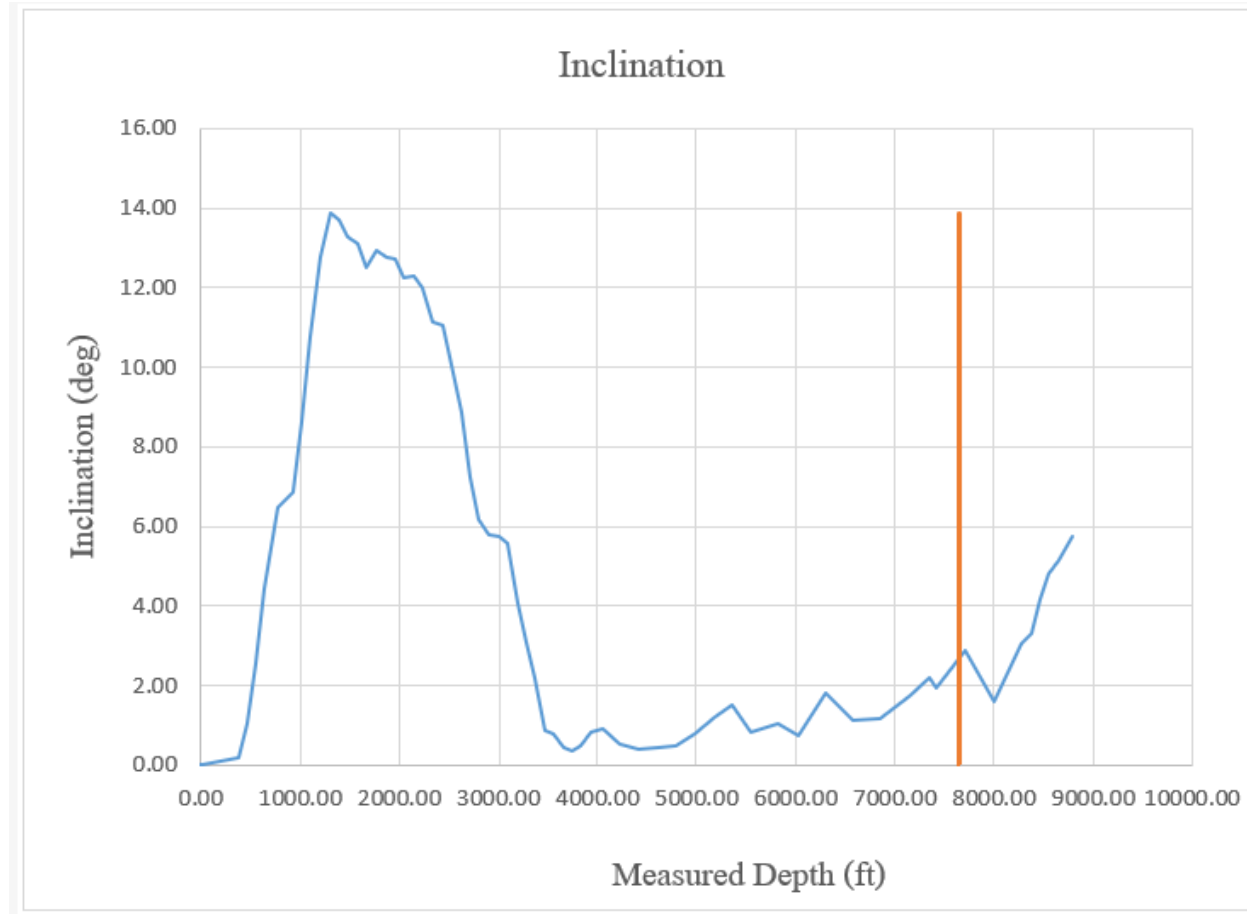
Anexo G.

RECORTE DE PANTALLA DE ANGVEL, HOJA PLAN VIEW



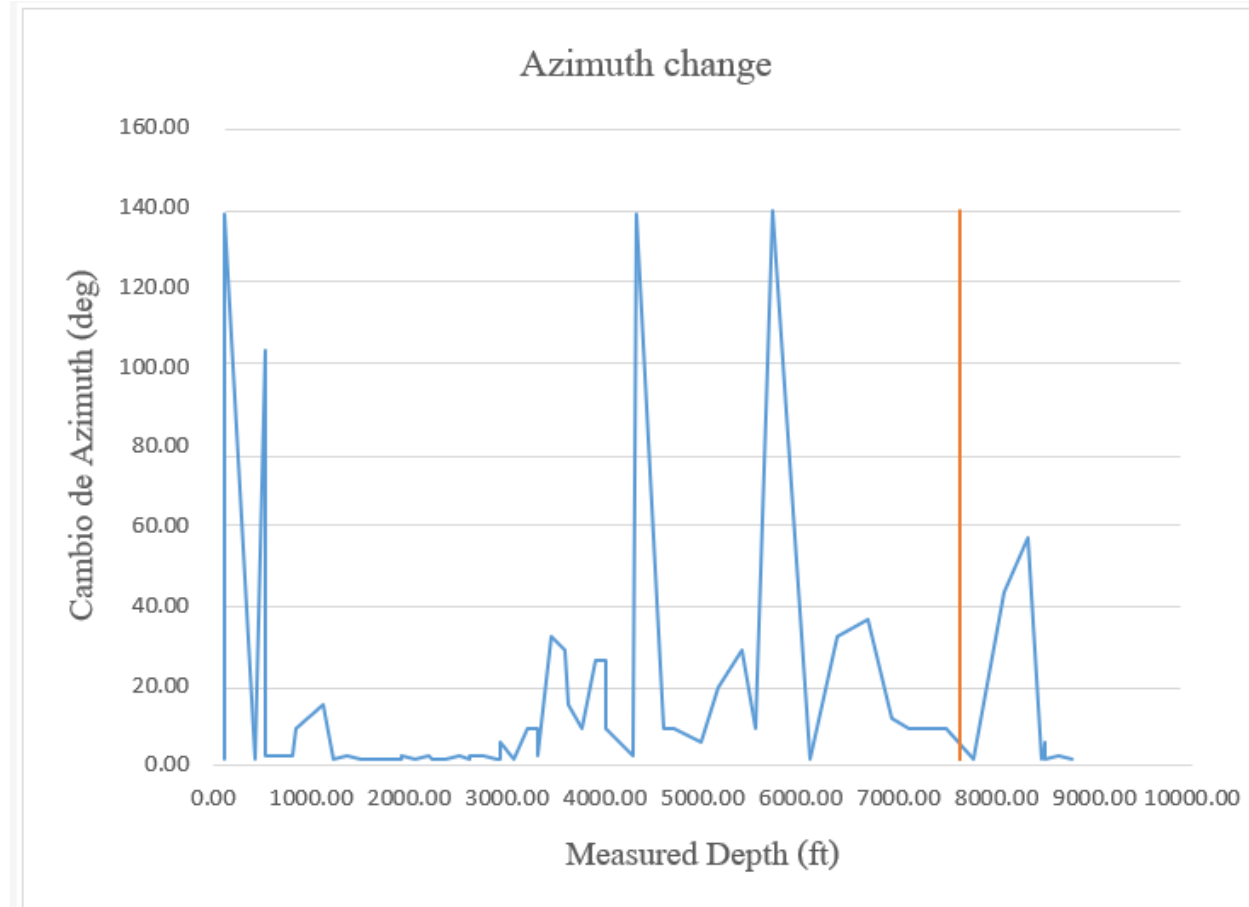
Fuente: elaboración propia

Anexo H.
RECORTE DE PANTALLA DE ANGVEL, HOJA INCLINATION



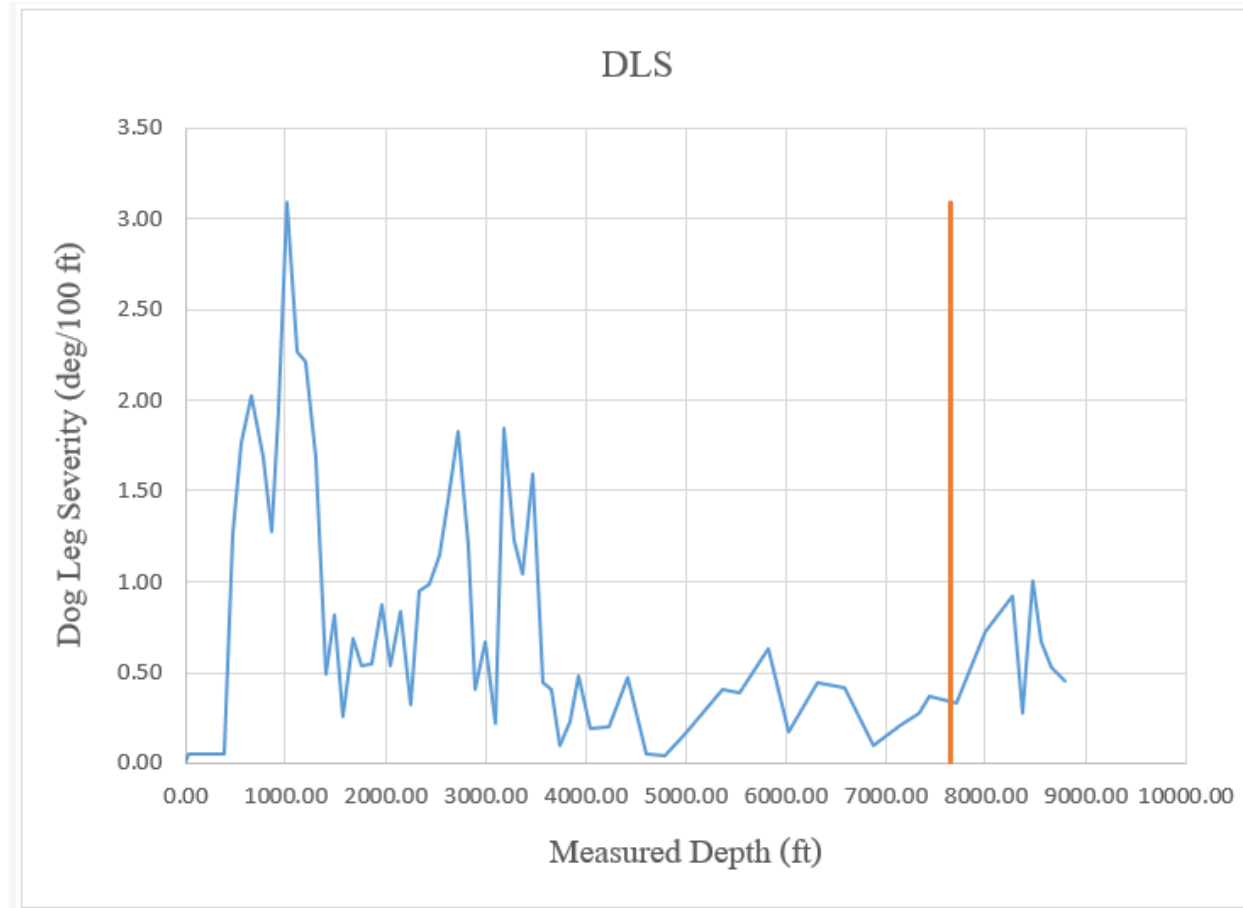
Fuente: elaboración propia

Anexo I.
RECORTE DE PANTALLA DE ANGVEL, HOJA AZIMUTH



Fuente: elaboración propia

Anexo J.
RECORTE DE PANTALLA DE ANGVEL, HOJA DLS



Fuente: elaboración propia