



**Universidad
Técnica de
Cotopaxi**

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI
FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA Y APLICADAS
CARRERA DE INGENIERÍA ELECTROMECAÁNICA
PROPUESTA TECNOLÓGICA

**“ANÁLISIS COMPARATIVO ENTRE EL MOTOR JAULA DE ARDILLA Y
EL MOTOR DE IMÁN PERMANENTE PARA LA EFICIENCIA
ELÉCTRICA EN EL POZO CUYABENO 68 COMO ALTERNATIVA DE
LEVANTAMIENTO ARTIFICIAL PARA LA EXTRACCIÓN DE CRUDO
POR BOMBEO ELECTROSUMERGIBLE”**

Autor:

Alomia Paredes Jorge Leonardo

Tutor:

Ing. Gallardo Molina Cristian Fabián

LATACUNGA – ECUADOR

2019



AVAL DE AUTORÍA

Yo Alomia Paredes Jorge Leonardo declaro ser autor del presente proyecto de investigación: **ANÁLISIS COMPARATIVO ENTRE EL MOTOR JAULA DE ARDILLA Y EL MOTOR DE IMÁN PERMANENTE PARA LA EFICIENCIA ELÉCTRICA EN EL POZO CUYABENO 68 COMO ALTERNATIVA DE LEVANTAMIENTO ARTIFICIAL PARA LA EXTRACCIÓN DE CRUDO POR BOMBEO ELECTROSUMERGIBLE**, siendo el Ing. Gallardo Molina Cristian Fabián tutor del presente trabajo; y eximo expresamente a la Universidad Técnica de Cotopaxi y a sus representantes legales de posibles reclamos o acciones legales.

Además, certifico que las ideas, conceptos, procedimientos y resultados vertidos en el presente trabajo investigativo, son de mi exclusiva responsabilidad.

Alomia Paredes Jorge Leonardo

C.I: 150072904-9



AVAL DEL TUTOR DE PROYECTO DE TITULACIÓN

En calidad de Tutor del Trabajo de Investigación sobre el título:

“ANÁLISIS COMPARATIVO ENTRE EL MOTOR JAULA DE ARDILLA Y EL MOTOR DE IMÁN PERMANENTE PARA LA EFICIENCIA ELÉCTRICA EN EL POZO CUYABENO 68 COMO ALTERNATIVA DE LEVANTAMIENTO ARTIFICIAL PARA LA EXTRACCIÓN DE CRUDO POR BOMBEO ELECTROSUMERGIBLE”, del postulante Alonía Paredes Jorge Leonardo, de la carrera de Ingeniería Electromecánica, considero que dicho Informe Investigativo cumple con los requerimientos metodológicos y aportes científico-técnico suficientes para ser sometidos a la evaluación del Tribunal de Validación de Proyecto que el Consejo Directivo de la Facultad de Ciencias de la Ingeniería y Aplicadas de la Universidad Técnica de Cotopaxi designe, para su correspondiente estudio y calificación.

Latacunga, Febrero, 2019

Ing. Gallardo Molina Cristian Fabián

C.I: 050284769-2

Tutor

AVAL DE APROBACION DEL TRIBUNAL DE TITULACIÓN

En calidad de Tribunal de Lectores, aprueban el presente Informe de Investigación de acuerdo a las disposiciones reglamentarias emitidas por la Universidad Técnica de Cotopaxi, y por la Facultad de Ciencias de la Ingeniería y Aplicadas; por cuanto, el postulante: Alonnia Paredes Jorge Leonardo con CI: 1500729049, con el título de Proyecto de titulación: "ANÁLISIS COMPARATIVO ENTRE EL MOTOR JAULA DE ARDILLA Y EL MOTOR DE IMÁN PERMANENTE PARA LA EFICIENCIA ELÉCTRICA EN EL POZO CUYABENO 68 COMO ALTERNATIVA DE LEVANTAMIENTO ARTIFICIAL PARA LA EXTRACCIÓN DE CRUDO POR BOMBEO ELECTROSUMERGIBLE" han considerado las recomendaciones emitidas oportunamente y reúne los méritos suficientes para ser sometido al acto de Sustentación de Proyecto.

Por lo antes expuesto, se autoriza realizar los empastados correspondientes, según la normativa institucional.

Latacunga, febrero del 2019

Para constancia firman:



Lector 1 (presidente)

Ing. Morcano Martínez Edwín Homero

C.I: 050260750-0



Lector 2

Ing. Freire Andrade Verónica Paulina.

C.I: 050205622-9



Lector 3

Ing. Corrales Batidas Byron Paul

C.I: 050234776-8



SERVICIOS DE INSTRUMENTACIÓN ESRAW S. A.
INSPECCIÓN EN N.I.C. - LABORATORIO CALIBRACIÓN PRESIÓN & GAS - INTERGENEACIÓN

AVAL DE IMPLEMENTACIÓN


Luis Sandro Chiliquinga Cando
Gerente General
Esraw S.A.
Presente

En calidad de Gerente General de **SERVICIOS DE INSTRUMENTACIÓN ESRAW S.A.** con R.U.C. 2290324893001, la cual es una empresa que se dedica a la prestación de servicios petroleros, confirmo mediante este documento que el estudiante **JORGE LEONARDO ALOMIA PAREDES** con C.I. 1500729049, elaboró un estudio de "ANÁLISIS COMPARATIVO ENTRE EL MOTOR JAULA DE ARDILLA Y EL MOTOR DE IMÁN PERMANENTE PARA LA EFICIENCIA ELÉCTRICA EN EL POZO CUYABENO 68 COMO ALTERNATIVA DE LEVANTAMIENTO ARTIFICIAL PARA LA EXTRACCIÓN DE CRUDO POR BOMBEO ELECTROSUMERGIBLE"; con el mismo aspira a la culminación de su Tesis de Grado y posterior obtención de Título de Ingeniero Electromecánico en la Universidad Técnica de Cotopaxi; este estudio estuvo bajo mi dirección y supervisión para validar que el resultado del análisis confirme la eficiencia entre motores.

Es cuanto puedo certificar en honor a la verdad se expide el presente documento para uso que el beneficiario crea conveniente.

Atentamente,

SERVICIOS DE INSTRUMENTACIÓN
ESRAW S.A.
RUC: 2290324893001
LABORATORIO DE CALIBRACIÓN


Ing. Luis S. Chiliquinga C. MSc.
GERENTE GENERAL (E)
(+593) 993701908 CNT
(+593) 998264956 Movistar
(+593) 63068450 Fijo

AGRADECIMIENTO

Agradezco primeramente a Dios por darme salud y vida para poder culminar mi carrera universitaria, a mis padres Jorge y Jhaneth por apoyarme siempre en todas las adversidades demostrándome que todo se puede lograr a base de esfuerzo y sacrificio ya que con ello hicieron de mi un buen hijo y una excelente persona, a mi esposa Valeria mi compañera de vida que siempre estuvo conmigo en las buenas y en las malas demostrándome día a día que no estoy solo y como no agradecerle a mi hija Dana por ser mi motor para sobrellevar los obstáculos que se me han presentado en la vida, a mis hermanos Verónica, Palmira y Raúl que a pesar de que estuve lejos jamás me faltó el cariño y aprecio de ustedes.

Leonardo

DEDICATORIA

A mi padre Jorge y mi madre Jhaneth por forjarme como la persona que soy ahora considerando que todos mis logros se los debo a ellos, a mi esposa Valeria por siempre creer en mí.

Leonardo

ÍNDICE

AVAL DE AUTORÍA.....	ii
AVAL DEL TUTOR DE PROYECTO DE TITULACIÓN.....	iii
AVAL DEL APROBACIÓN DEL TRIBUNAL DE TITULACIÓN.....	iv
AVAL DE IMPLEMENTACION.....	v
RESUMEN.....	xv
ABSTRACT.....	xvi
AVAL DE TRADUCCIÓN.....	xvii
1.INFORMACIÓN BÁSICA.....	1
2. DISEÑO INVESTIGATIVO DE LA PROPUESTA TECNOLÓGICA.....	3
2.1. Título de la propuesta tecnológica.....	3
2.2. Tipo de alcance.....	3
2.3. Área del conocimiento.....	3
2.4. Sinopsis de la propuesta tecnológica.....	3
2.5. Objeto de estudio y campo de acción.....	3
2.5.1. Objeto de estudio.....	3
2.5.2. Campo de acción.....	4
2.6. Situación problémica y problema.....	4
2.6.1. Situación problémica.....	4
2.6.2. Problema.....	5
2.7. Hipótesis o formulación de pregunta científica.....	5
2.8. Objetivo(s).....	5
2.8.1. Objetivo general.....	5
2.8.2. Objetivos específicos.....	5
2.9. Descripción de las actividades y tareas propuestas con los objetivos establecidos.....	6
3. MARCO TEÓRICO.....	8
3.1. Introducción.....	8
3.2.Sistemas de Levantamiento Artificial (ALS).....	8
3.2.1.Gas lift.....	8
3.2.2.Bombeo Mecánico.....	9
3.2.3 Bombeo Hidráulico.....	9
3.2.4 Bombeo Electrosumergible.....	10
3.3.El sistema de bombeo electrosumergible.....	11

3.3.1. Componentes del sistema electrosumergible.....	12
3.4. Datos requeridos del pozo de estudio	17
4. METODOLOGÍA.....	19
4.1. Parámetros de los sistemas de bombeo electrosumergible (BES).....	19
4.1.1. Voltaje	19
4.1.2. Corriente	19
4.1.3. Resistencia.....	20
4.1.4. Ley de Ohm	20
4.1.5. Frecuencia.....	20
4.1.6. Potencia	20
4.1.7. Inductancia.....	21
4.1.8. Capacitancia.....	21
4.1.9. Impedancia.....	21
4.1.10. Densidad	21
4.1.11. Gravedad del petróleo (SG_0).....	21
4.1.12. Gradiente de presión.....	22
4.1.13. Corte de agua (WC).....	22
4.1.14. Presión	22
4.1.15. Presión manométrica	22
4.1.16. Presión atmosférica	22
4.1.17. Altura de columna	22
4.1.18. Presión a la entrada de bomba (PIP).....	22
4.1.19. PIP requerido	23
4.1.20. Presión de burbuja	23
4.1.21. Relación gas petróleo (GOR)	23
4.1.22. Factor volumétrico del petróleo (β_o).....	23
4.1.23. Viscosidad (μ)	23
4.1.24. Caudal.....	24
4.1.25. Fricción de la tubería	24
4.2. Dimensionamiento de un sistema de bombeo electrosumergible.....	24
4.2.1. Índice de Productividad	24
4.2.2. Caudal máximo para $P_{wf}=0$ con IP constante	25
4.2.3. Caudal correspondiente a P_b	25
4.2.4. Caudal máximo.....	25

4.2.5.Presión a la entrada de la bomba (PIP).....	26
4.2.6.Cálculo del gas	26
4.2.7.Cálculos de factores volumétricos.....	27
4.2.8.Cantidad de gas total producido	27
4.2.9.Cantidad de gas en solución en la entrada de la bomba	28
4.2.10.Gas libre.....	28
4.2.11.Volumen total a la entrada de la bomba	28
4.2.12.Porcentaje de gas libre a la entrada de la bomba (%).....	29
4.2.13.Volumen real ingerido por la bomba.....	30
4.2.14.Relación gas – petróleo en la tubería (GOR_{th}).....	30
4.2.15.Cálculo de la gravedad específica (SG_{mix})	31
4.2.16.Cabeza dinámica total.....	32
4.2.17.Numero de etapas de la bomba.....	33
4.2.18.Cálculo de potencia de freno	34
4.2.19.Consumo energético del sistema BES	34
4.2.20.Cálculo de KVA del sistema	35
4.3. Software de simulación	35
5. ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	36
5.1. Resultados obtenidos	36
5.2. Simulación en Autograph PC	36
5.2.1. Procedimiento de ingreso de datos generales para el diseño.....	36
5.4. Listado de equipos para cada sistema.....	57
5.5. Listado de operación de los equipos.....	57
5.6. Costo anual del consumo de energía	59
5.7. Análisis Económico.....	60
5.7.1. Ingresos.....	60
5.7.2. Egresos	61
5.7.3. Valor Actual Neto (VAN)	61
5.7.4. Tasa Interna de Retorno (TIR).....	61
5.7.5. Relación Costo – Beneficio (RCB)	62
5.7.6. Evaluación Económica	62
5.7.7. Costo de producción	67
6. PRESUPUESTO.....	68
6.1. Análisis de impactos.....	68

6.1.1. Impacto económico:	68
6.1.2. Impacto tecnológico	68
7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	69
7.1. Conclusiones.....	69
7.2. Recomendaciones	69
8. NOMENCLATURA.....	71
9. REFERENCIAS	73

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 3.1. Modelo de ALS por Gas Lift	8
Figura 3.2. Bombeo mecánico (Balancín en la cabeza arriba)	9
Figura 3.3. Bombeo mecánico (Balancín en la cabeza abajo).....	9
Figura 3.4. Bombeo hidráulico.....	10
Figura 3.5. Bombeo electrosumergible	10
Figura 3.6. Bombeo electrosumergible	11
Figura 3.7. Transformador reductor	12
Figura 3.8. Transformador elevador.....	12
Figura 3.9. Tablero de conexiones	13
Figura 3.10. Tablero de conexiones	13
Figura 3.11. Variador electrospeed	14
Figura 3.12. Corte de bomba.....	14
Figura 3.13. Etapa de la bomba.....	15
Figura 3.14. Separador de gas	15
Figura 3.15. Sello	16
Figura 3.16. Componentes del motor	16
Figura 3.17. Sensor de fondo	17
Figura 4.1. Ley de Ohm	20
Figura 4.2. Comportamiento del gas	23
Figura 5.1 Portada inicial del software de simulación	37
Figura 5.2. Portada para selección del sistema de ALS	38
Figura 5.3. Portada para ingreso de datos operacionales del pozo	39
Figura 5.4. Portada para ingreso de datos de propiedades del fluido	40
Figura 5.5. Portada para ingreso de temperatura del modelo de estudio.....	40
Figura 5.6. Portada para ingreso de rendimiento de entrada de BES	41
Figura 5.7. Portada para ingreso del objetivo del sistema BES.....	42
Figura 5.8. Datos transitorios de perforación.....	42
Figura 5.9. Presiones de superficie y del fluido.	43
Figura 5.10. Simulación de well del pozo Cuyabeno 68.....	49
Figura 5.11. Pantalla inicial de dimensionamiento de la bomba.....	50
Figura 5.12. Dimensionamiento de la bomba del sistema BES.	50
Figura 5.13. Punto de diseño de la bomba del sistema BES.	51
Figura 5.14. Punto de diseño de acuerdo a condiciones del sistema BES.....	51
Figura 5.15. Selección de la nomenclatura de la bomba del sistema BES.....	52
Figura 5.16. Selección de la serie y tipo de la bomba del sistema BES.....	52

Figura 5.17. Simulación y obtención de la bomba del pozo Cuyabeno 68.	53
Figura 5.18. Pantalla inicial de dimensionamiento del motor del sistema BES.....	54
Figura 5.19. Input data del motor del sistema BES.....	54
Figura 5.20. ADR del motor del sistema BES.	55
Figura 5.21. Selección del motor del sistema BES.	55
Figura 5.22. Simulación y obtención del motor del pozo Cuyabeno 68.	56
Figura 5.23. Comparativa del número de etapas de los sistemas BES.....	57
Figura 5.24. Comparativa de los voltajes de operación de los sistemas BES	58
Figura 5.25. Corriente de los motores	58
Figura 5.26. Revoluciones por minuto de los motores.....	58
Figura 5.27. Temperatura de los motores.....	59
Figura 5.28. Comparativa del consumo de energía de los sistemas BES.....	59
Figura 5.29. Características operacionales de los sistemas	60
Figura 5.30. Tiempo de recuperación de la inversión de los sistemas BES.....	67
Figura 5.31. Comparativa de costos de los sistemas BES.....	67

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1. Sistema de tareas por objetivos	6
Tabla 2.2. Operación de variables	7
Tabla 3.1. Datos de requerimiento del pozo para los dos motores	18
Tabla 4.1. Grafica de pérdidas por fricción	33
Tabla 5.1. Resultados de variables calculadas	36
Tabla 5.2. Selección de equipos para cada sistema BES	57
Tabla 5.3. Parámetros operacionales para cada sistema BES	57
Tabla 5.4. Consumo energético para cada sistema BES	59
Tabla 5.5. Características de VAN	61
Tabla 5.6. Características de TIR	62
Tabla 5.7. Características de RCB	62
Tabla 5.8. Análisis económico para el sistema BES con SCE	66
Tabla 5.9. Análisis económico para el sistema BES con PMM	66
Tabla 5.10. Costos de producción para cada sistema BES	67
Tabla 6.1. Presupuesto de la propuesta tecnologica	68

UNIVERSIDAD TECNICA DE COTOPAXI

FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERIAS Y APLICADAS

CARRERA DE INGENIERIA ELECTROMECHANICA

TITULO: “ANÁLISIS COMPARATIVO ENTRE EL MOTOR JAULA DE ARDILLA Y EL MOTOR DE IMÁN PERMANENTE PARA LA EFICIENCIA ELÉCTRICA EN EL POZO CUYABENO 68 COMO ALTERNATIVA DE LEVANTAMIENTO ARTIFICIAL PARA LA EXTRACCIÓN DE CRUDO POR BOMBEO ELECTROSUMERGIBLE”

Autor:

Alomia Paredes Jorge Leonardo

RESUMEN

El presente trabajo investigativo desglosa un análisis comparativo de dos motores como son el motor jaula de ardilla y el motor de imán permanente que podrían ser implementados en un sistema de bombeo electrosumergible como alternativa de levantamiento artificial para la extracción de crudo en el pozo Cuyabeno 68, se realiza este estudio ya que en este pozo no existe una investigación enfocada a la eficiencia eléctrica del motor de imán permanente; para llevar a cabo este estudio se implementó un modelamiento de un sistema bombeo electrosumergible para cada motor utilizando características operacionales que requiere el pozo, este diseño se realizó mediante cálculos matemáticos, una vez encontradas las variables como: el número de etapas de la bomba; estas fueron relativamente comparadas con datos obtenidos de un software de simulación que sirve únicamente para el modelamiento de sistemas de levantamiento artificial. Luego se procede a la comparación de datos operacionales de cada motor como son: velocidad, temperatura, voltaje, corriente y consumo de energía de cada máquina, para finalmente elaborar un estudio económico determinando la viabilidad tanto técnica como económica y el cumplimiento de la eficiencia eléctrica en el sistema de bombeo electrosumergible por lo cual se determinar que la mejor opción en el pozo Cuyabeno 68 es el motor de imán permanente por su bajo consumo y costo de energía.

Palabras claves: bombeo electrosumergible, levantamiento artificial, viabilidad

COTOPAXI TECHNICAL UNIVERSITY

FACULTY OF ENGINEERING AND APPLIED SCIENCES

ELECTROMECHANICAL ENGINEERING CAREER

TOPIC: “COMPARATIVE ANALYSIS BETWEEN THE MOTOR CAGE OF SQUIRREL AND THE MOTOR OF PERMANENT MAGNET FOR THE ELECTRICAL EFFICIENCY IN THE POZO CUYABENO 68 AS AN ALTERNATIVE OF ARTIFICIAL LIFTING FOR THE EXTRACTION OF CRUDE BY ELECTROSUMERGIBLE PUMPING”

Author:

Alomia Paredes Jorge Leonardo

ABSTRACT

This research includes a comparative analysis of two engines such as the squirrel cage engine and the permanent magnet engine that could be implemented in an electrosubmersible pumping system as an artificial lifting alternative for crude oil extraction in Cuyabeno well 68, this research is performed because there is no research focused on the electrical efficiency of permanent magnet engine in this well, to carry out this research an electrosubmersible modeling pumping system was implemented for each engine using operational characteristics required by the well, this design was made by mathematical calculations, after finding the variables such as: pumping stages number were found; these were relatively compared with data obtained from a simulation software that serves only for the modeling of artificial lifting systems. The research continued to compare data each engine operational such as: speed, temperature, voltage, current and energy consumption of each machine, finally to develop an economic study to determine technical and economic feasibility to achieve the electrical efficiency in the electrosubmersible pumping system to determine the best option in Cuyabeno well 68 is the permanent magnet engine for its low consumption and energy cost.

Keywords: electric submersible pumping, artificial lifting, viability



Universidad
Técnica de
Cotopaxi

CENTRO DE IDIOMAS

AVAL DE TRADUCCIÓN

En calidad de Docente del Idioma Inglés del Centro de Idiomas de la Universidad Técnica de Cotopaxi; en forma legal **CERTIFICO** que: La traducción del resumen de tesis al Idioma Inglés presentado por el señor Egresado de la Carrera de Ingeniería electromecánica de la Unidad Académica de **CIENCIAS DE LA INGENIERÍA Y APLICADAS ALOMIA PAREDES JORGE LEONARDO**, cuyo título versa **"ANÁLISIS COMPARATIVO ENTRE EL MOTOR JAULA DE ARDILLA Y EL MOTOR DE IMÁN PERMANENTE PARA LA EFICIENCIA ELÉCTRICA EN EL POZO CUYABENO 68 COMO ALTERNATIVA DE LEVANTAMIENTO ARTIFICIAL PARA LA EXTRACCIÓN DE CRUDO POR BOMBEO ELECTROSUMERGIBLE"**, lo realizó bajo mi supervisión y cumple con una correcta estructura gramatical del idioma.

Es todo cuanto puedo certificar en honor a la verdad y autorizo al peticionario hacer uso del presente certificado de la manera ética que estimaren conveniente.

Latacunga, Febrero del 2019.

Atentamente,

Lic. Ms.C. Veronica Alexandra Rosales Pijal
DOCENTE CENTRO DE IDIOMAS
C.C. 100310698-4



1. INFORMACIÓN BÁSICA

Propuesto por:

Alomia Paredes Jorge Leonardo

Tema aprobado:

Análisis comparativo entre el motor jaula de ardilla y el motor de imán permanente para la eficiencia eléctrica en el pozo Cuyabeno 68 como alternativa de levantamiento artificial para la extracción de crudo por bombeo electrosumergible.

Carrera:

Facultad de Ciencias de la Ingeniería y Aplicadas, Carrera de Ingeniería en Electromecánica

Director de la propuesta tecnológica:

Gallardo Molina Cristian Fabián Ing.

Equipo de trabajo:

Gallardo Molina Cristian Fabián Ing.

Alomia Paredes Jorge Leonardo

Lugar de ejecución:

Sucumbíos Zona 1, Región Amazónica, El Coca, Cuyabeno.

Tiempo de duración de la propuesta:

Inicio Octubre 2018 – Finalización Febrero 2019

Fecha de entrega:

Febrero del 2019

Línea(s) y sub líneas de investigación

Línea 5: Energías alternativas y renovables, eficiencia energética y protección ambiental

Esta línea de investigación abarca tres grandes ejes para su accionar investigativo, que están en correspondencia con los objetivos nacionales e internacionales de investigación, desarrollo tecnológico e innovación en esta área. Se integran todas aquellas investigaciones que busquen promover el aprovechamiento de las energías alternativas y renovables, fomentar y promocionar el uso eficiente de la energía (Eficiencia Energética) en los diferentes sectores (Industrial, Residencial, Público, Transporte y Agrícola), y reducir el impacto medioambiental derivado de la utilización de los recursos energéticos.

Sub líneas de investigación de la carrera:

De acuerdo a la presente propuesta se desglosa la siguiente sub línea:

- ✓ Eficiencia energética en sistemas electromecánicos y su uso de energías alternativas

Tipo de propuesta tecnológica:

El presente proyecto consiste en la elaboración de un estudio comparativo del motor jaula de ardilla y el motor de imán permanente en el sistema de bombeo electrosumergible el cual aportara fructíferamente en la toma de decisiones al implementar cualquiera de las dos tecnologías al momento de extraer crudo, este procedimiento se lo realizará mediante cálculos matemáticos los mismos que serán debidamente comparados con un software de simulación para la respectiva validación de los valores obtenidos y con ello determinar la viabilidad de las dos tecnologías en mención.

2. DISEÑO INVESTIGATIVO DE LA PROPUESTA TECNOLÓGICA

2.1. Título de la propuesta tecnológica

Análisis comparativo entre el motor jaula de ardilla y el motor de imán permanente para la eficiencia eléctrica en el pozo Cuyabeno 68 como alternativa de levantamiento artificial para la extracción de crudo por bombeo electrosumergible.

2.2. Tipo de alcance

La propuesta es interdisciplinaria ya que involucra un sin número de disciplinas las cuales se han adquirido a lo largo de la formación académica. De la misma manera se considera integrador debido a que intervienen varios conocimientos adoptados a lo largo de la formación profesional como son mecánicos, electrónicos y eléctricos.

2.3. Área del conocimiento

El área de conocimiento de la UNESCO vigente en la normativa del SENESCYT y de acuerdo a su área Ingeniería, industria y construcción, con su respectiva sub área de conocimiento 52 Ingeniería y profesiones afines, está enfocada en la fusión de sistemas mecánicos, así como de sistemas electrónicos que darán lugar al análisis comparativo de los motores en mención a la temática donde se es necesario la combinación viable de conocimientos compartidos del área de eléctrica, electrónica y mecánica ya que es el pilar de las ramas del saber de la profesión mediante la cual se aportara sustancialmente en la óptima ejecución y puesta en marcha de la presente propuesta

2.4. Sinopsis de la propuesta tecnológica

El proyecto sintetiza una elaboración óptima de un estudio comparativo entre el motor trifásico jaula de ardilla y el motor trifásico de imán permanente en un sistema de bombeo electrosumergible de un pozo petrolero ecuatoriano, este estudio será capaz de satisfacer las dudas de las empresas de producción al momento de optar por cualquiera de las dos opciones tecnológicas a comparar.

El estudio estará comprendido por un diseño, simulación y comparación de variables obtenidas para lo cual se utilizará datos reales de parámetros operacionales del pozo para ser aplicados mediante fórmulas específicas para fusionarlos con cálculos matemáticos y poder obtener los resultados esperados que aporten sustancialmente al estudio de las tecnologías en mención.

2.5. Objeto de estudio y campo de acción

2.5.1. Objeto de estudio

Análisis operacional del motor jaula de ardilla y del motor de imán permanente

2.5.2. Campo de acción

Eficiencia energética de los motores jaula de ardilla y el motor de imán permanente en el bombeo electrosumergible.

2.6. Situación problemática y problema

2.6.1. Situación problemática

La industria del petróleo en el Ecuador acoge a un sin número de empresas la mayoría extranjeras prestadoras de servicios petroleros las cuales poseen sus oficinas centrales en la ciudad de Quito desde la cual se manejan los trabajos y operaciones de campo, los mismos que se llevan a cabo en el Oriente Ecuatoriano centrandose sus servicios técnicos en los yacimientos de crudo para elaborar la fase de producción una vez realizados los trabajos posteriores como perforación, evaluación, terminación se procede a la respectiva producción del fluido la cual es la extracción del petróleo a la superficie que implementa tecnología de levantamiento artificial usando bombeo electrosumergible.

Entrando a la recesión del petróleo a nivel mundial surge la tecnología del motor de imán permanente en los sistemas de bombeo electrosumergible es por ello que se delimita esta propuesta tecnológica ya que aportará fructíferamente con la determinación de la eficiencia de los motores y su viabilidad para ser adoptadas como un boom tecnológico en el sector petrolero ecuatoriano enfocados en el sistema de levantamiento artificial.

La empresa Novomet pionera del motor de imán permanente afirma que la implementación de su motor en los sistemas de bombeo electrosumergible es una de las mejores alternativas en el ámbito tecnológico de los sistemas de levantamiento artificial ya que aseguran que su motor es mucho más eficiente a comparación del motor jaula de ardilla basándose en parámetros de operación como trabajos de resistividad a altas temperaturas, altas profundidades y mayor producción de barriles por día.

Los beneficiarios directos en la presente propuesta tecnológica son las empresas operadoras ya que ellas son las que delimitan la tecnología que van a implementar en sus pozos para la etapa de producción de crudo la cual no es más que extraer el petrolero que se encuentra en las profundidades del yacimiento ya sea con la implementación de cualquier método de levantamiento artificial en este caso sería por bombeo electrosumergible, como beneficiarios indirectos serían las empresas prestadoras de servicios petroleros ya que en este caso serían las empresas que disponen de la línea de levantamiento artificial las cuales brindan el servicio sistema de bombeo electrosumergible con motor de imán permanente.

2.6.2. Problema

La falta de un análisis comparativo enfocado en buscar la eficiencia eléctrica entre el motor de imán permanente y el motor jaula de ardilla en el sistema de levantamiento artificial para optimizar la extracción de crudo en el pozo Cuyabeno 68 en el año 2018 el mismo que provoca en las empresas operadores la incertidumbre del uso o no del motor de imán permanente en su etapa de producción es por ello que el motor en mención aportará sustancialmente en la optimización de energía y el tiempo recuperación de la inversión inicial a menores días posibles.

2.7. Hipótesis o formulación de pregunta científica

Mediante el análisis comparativo de los motores jaula de ardilla y el motor de imán permanente será posible alcanzar el mejoramiento de la eficiencia eléctrica del sistema de bombeo electrosumergible y con ello mejorar la producción del pozo.

2.8. Objetivo(s)

2.8.1. Objetivo general

Analizar la eficiencia eléctrica mediante el dimensionamiento de un sistema de bombeo electrosumergible como método de levantamiento artificial para el pozo Cuyabeno 68 desarrollando cálculos matemáticos los mismos que serán comparados con un software de simulación, para delimitar la bomba adecuada y con ello la selección optima del motor para el sistema de producción.

2.8.2. Objetivos específicos

- Realizar una indagación profunda de fuentes bibliográficas, todo lo concerniente a sistemas de bombeo electrosumergible delimitando la información relevante de los dos motores en mención y su vinculación a la eficiencia eléctrica para determinar las aristas a ser consideradas en el presente estudio.
- Dimensionar un sistema de bombeo electrosumergible mediante cálculos matemáticos los mismos que serán comparados con datos obtenidos de un software de simulación para seleccionar adecuadamente la bomba.
- Evaluar las características operacionales obtenidas mediante selección de cada motor por medio de gráficas y tablas para determinar si cumple o no un porcentaje de eficiencia eléctrica.
- Determinar la viabilidad y el tiempo de recuperación de la inversión económica inicial del sistema con cada motor.

2.9. Descripción de las actividades y tareas propuestas con los objetivos establecidos

Tabla 2.1. Sistema de tareas por objetivos

Objetivo	Tareas por objetivo	Resultado de la actividad	Descripción de la actividad
Realizar una indagación profunda de fuentes bibliográficas, todo lo concerniente a sistemas de bombeo electrosumergible delimitando la información relevante de los dos motores en mención y su vinculación a la eficiencia eléctrica para determinar las aristas a ser consideradas en el presente estudio.	Lectura de los principios generales de los sistemas de levantamiento artificial.	Conocimiento teórico de los tipos de sistemas de levantamiento artificial.	Se realizará la revisión e interpretación de información de fuentes bibliográficas relacionadas a sistemas de bombeo electrosumergible
	Visualización de gráficos y videos de los sistemas de bombeo electrosumergible y eficiencia eléctrica de motores.	Conocimiento depurado de los tipos de levantamiento artificial viabilizando la eficiencia eléctrica en el sistema de bombeo electrosumergible	
	Análisis de los parámetros que contemplan la eficiencia eléctrica en los motores eléctricos.		
Dimensionar un sistema de bombeo electrosumergible mediante cálculos matemáticos los mismos que serán comparados con datos obtenidos de un software de simulación para seleccionar adecuadamente la bomba.	Obtener un modelo analítico para el modelamiento de un sistema de bombeo electrosumergible.	Determinar las fórmulas necesarias para el modelamiento de un sistema de bombeo electrosumergible.	Memoria de cálculos matemáticos.
	Determinar la selección adecuada de la bomba.	Propiedades operacionales del pozo.	Ficha del número de etapas obtenido.
	Analizar los resultados obtenidos mediante el matemático y los datos del software de las características operacionales de cada motor.	Simulación y comparación de las características operacionales de cada motor.	Ficha de variables obtenidas con los cálculos matemáticos y software.

Evaluar las características operacionales obtenidas mediante selección de cada motor por medio de gráficas y tablas para determinar si cumple o no un porcentaje de eficiencia eléctrica.	Simulación en software de las características operacionales del motor	Comparar parámetros eléctricos de cada motor.	Analizar los gráficos y tablas de los resultados.
Determinar la viabilidad y el tiempo de recuperación de la inversión económica inicial del sistema con cada motor.	Análisis económico de cada una de las tecnologías en el sistema BES	Van, Tir, Rcb y Tiempo de recuperación de la inversión	Interpretación mediante tablas y gráficas.

Tabla 2.2. Operacionalización de variables

VARIABLES	DEFINICIÓN CONCEPTUAL	UNIDAD DE MEDIDA	MEDIOS
Corriente	Es la corriente que circula en el motor electrosumergible en condiciones nominales de funcionamiento.	[Amperios]	Cálculos matemáticos y software
Voltaje	Voltaje necesario para suministrar a los terminales del motor electrosumergible.	[Voltios]	Cálculos matemáticos y software
Frecuencia	Es una magnitud que mide el giro sustancial del motor.	[Hz]	Cálculos matemáticos y software
Consumo de energía	Magnitud que mide el consumo de energía en factores económicos considerando un indicador del grado de desarrollo económico de un estado.	[Kw/h]	Cálculos matemáticos

3. MARCO TEÓRICO

3.1. Introducción

Se delimita esta propuesta tecnológica por la inserción del motor de imán permanente por parte de una empresa Rusa “Novomet” en los sistemas de bombeo electrocsumergible la misma que afirma la viabilidad tanto técnica como económica de la implementación del motor de imán permanente en los sistemas de levantamiento artificial para mejorar la eficiencia eléctrica y con ello optimizar la producción de crudo de los yacimientos, es por ello que el pozo Cuyabeno 68 aportará dando fe de lo que afirma la empresa Rusa.

El presente documento describe fundamentalmente una base inicial para la comprensión del estudio comparativo del motor jaula de ardilla y el motor de imán permanente en los sistemas de bombeo electrosumergible para establecer los fundamentos técnicos necesarios para la evaluación del proceso productivo del pozo Cuyabeno 68 a partir de variables que aporten datos de trabajo precedente en el pozo.

3.2. Sistemas de Levantamiento Artificial (ALS)

El sistema de levantamiento artificial es un mecanismo que agrega energía a una columna de fluido de un pozo con el único fin de iniciar y mejorar la producción del yacimiento [1]. Los sistemas de levantamiento artificial se utilizan en diversidad de principios de operación, incluyendo varios métodos como: Gas Lift, Bombeo Mecánico, Bombeo Hidráulico y el más utilizado Bombeo Electrosumergible

3.2.1. Gas lift

Se puede decir que un pozo fluye mediante flujo natural, está en cierta forma utilizando el sistema de levantamiento mediante gas lift (como se muestra en la Figura 3.1) [1]. Cuando la energía del gas comprimido en el reservorio es la principal fuerza que hace que el petróleo fluya hasta superficie.

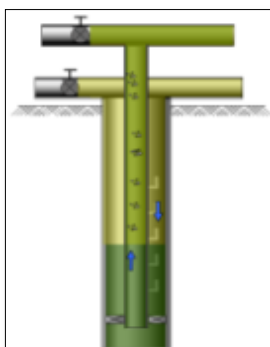


Figura 3.1. Modelo de ALS por Gas Lift

Fuente: [1]

3.2.2. Bombeo Mecánico

Es un método de transferencia de fluido casi continuo que se encuentra en el fondo del pozo y son llevados a la superficie (como se muestra en la Figura 3.2 y 3.3). El balancín de superficie imparte el movimiento de sube y baja a la sarta de varillas de succión que mueve el pistón de la bomba colocada en la sarta de producción a cierta profundidad del fondo del pozo [2].

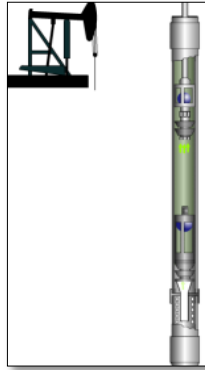


Figura 3.2. Bombeo mecánico (Balancín en la cabeza arriba)

Fuente: [2]

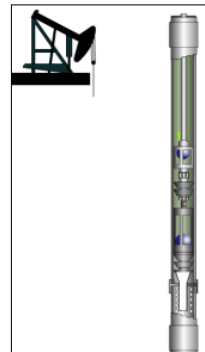


Figura 3.3. Bombeo mecánico (Balancín en la cabeza abajo)

Fuente: [2]

Se puede decir que este tipo de sistema es uno de los más antiguos en el levantamiento artificial además de ser uno de los sistemas más empleados en el mundo. La ventaja de este sistema es que es de fácil operación y físicamente visible.

3.2.3 Bombeo Hidráulico

Este sistema se origina con la finalidad de crear un sistema de levantamiento de petróleo sin enlaces mecánicos ni varillas de succión (como se muestra en la Figura 3.4), aquí se emplea un fluido hidráulico para mover la bomba y el motor [1].

3.3. El sistema de bombeo electrosumergible

El Bombeo electrosumergible es un sistema integrado de levantamiento artificial, es considerado como un medio económico y efectivo para levantar altos volúmenes de fluido desde grandes profundidades en una variedad de condiciones de pozo (como se muestra en la Figura 3.6). Es más aplicable en yacimientos con altos porcentajes de agua y baja relación gas-aceite; sin embargo en la actualidad estos equipos han obtenido excelentes resultados en la producción de fluidos de alta viscosidad, en pozos gasíferos, en pozos con fluidos abrasivos, en pozos de altas temperaturas y de diámetro reducido, etc. [3]....

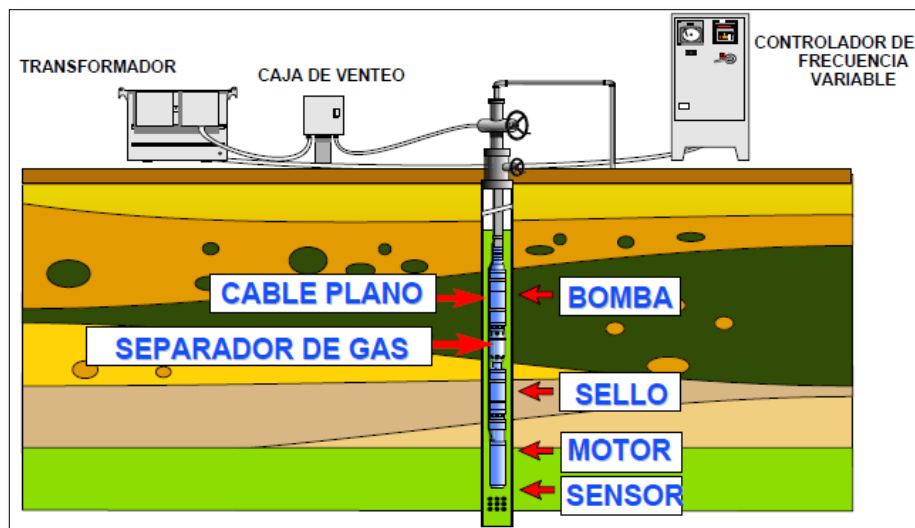


Figura 3.6. Bombeo electrosumergible

Fuente: [4]

La producción de petróleo por métodos artificiales es requerida cuando la energía natural asociada con los fluidos no produce una presión diferencial suficientemente grande entre el yacimiento y la cavidad del pozo como para levantar los fluidos del yacimiento hasta las instalaciones de superficie, o es insuficiente para producir a niveles económicos.

Los componentes del sistema de Bombeo Electrosumergible pueden ser clasificados en dos partes, el equipo de fondo y el equipo de superficie. El equipo de fondo cuelga de la tubería de producción y cumple la función de levantar la columna de fluido necesaria para producir el pozo, consiste principalmente de un motor eléctrico, un sello, un separador de gas y una bomba electrocentrífuga [4].

Un cable de poder transmite la energía eléctrica de la boca del pozo hasta el motor. El equipo de superficie provee de energía eléctrica al motor electrosumergible y controla su funcionamiento. Los principales componentes de superficie son los transformadores, el tablero o variador de control y la caja de venteo [4].

3.3.1. Componentes del sistema electrosumergible

Son aquellos elementos que forman parte integral del sistema BES los cuales pueden ser tanto equipos de superficie como de fondo los cuales son detallados a continuación.

3.3.1.1. Equipos de Superficie

Son aquellos componentes del bombeo electrosumergible que como su nombre lo dice se encuentran en la superficie mediante maquinas eléctricas las cuales cumplen con la función de regular la energía eléctrica y realizar el control del equipo de fondo puntualizando los parámetros de operación [4].

3.3.1.1.1. Transformador

El transformador se implementa ya que es un requerimiento de operación para los variadores ya que necesitan una entrada entre 460 – 480 V. Esta tensión se logra con el transformador reductor (SDT) (como se muestra en la Figura 3.7), el cual reduce el voltaje de línea (13.8 kv o 34.5 kv) [4].



Figura 3.7. Transformador reductor
Fuente: [4]

La tensión de salida del variador necesita de otro transformador en este caso sería un elevador (SUT) (como se muestra en la Figura 3.8), para que eleve el voltaje a (1000 – 3760) ya que esta tensión es la requerida por el motor que se encuentra en el sistema de fondo del sistema de bombeo electrosumergible.



Figura 3.8. Transformador elevador
Fuente: [4]

3.3.1.1.2. Caja de venteo

Elemento de maniobra (como se muestra en la Figura 3.9), la cual cumple con tres funciones primordiales: Conectar los cables de energía con la bomba, ventilar con la atmosfera los gases que puedan estar atrapados dentro de los cables del motor y permite un rápido chequeo de los voltajes y corrientes para diagnosticar los problemas en el equipo de fondo.



Figura 3.9. Tablero de conexiones
Fuente: [4]

3.3.1.1.3. Cabezal

Es aquel elemento que soporta la carga de la tubería que se encuentra suspendida en el pozo este elemento también cumple con la función de mantener la presión durante operaciones de control del pozo proporcionando al mismo una hermeticidad adecuada para el control de fluidos (como se muestra en la Figura 3.10).



Figura 3.10. Tablero de conexiones
Fuente: [4]

3.3.1.1.4. Variador de velocidad

Es aquella maquina eléctrica (como se muestra en la Figura 3.11), que cumple con la función de hacer trabajar a la bomba del motor a diferentes velocidades, variando la frecuencia de la

corriente AC. Para evitar daños en el motor el VSD se puede variar el voltaje con la frecuencia para mantener constante la relación Voltio/Hertz.



Figura 3.11. Variador electrospeed
Fuente: [4]

3.3.1.2. Equipos de fondo

Son aquellos elementos electromecánicos que conforman la parte compacta del sistema bombeo a continuación se detallara cada uno de sus componentes y la funcionalidad de las mismas en la operación de producción el fluido.

3.3.1.2.1. Bomba

Las bombas son de tipo centrífugo de múltiples etapas (como se muestra en la Figura 3.12), cada etapa consiste de un impulsor (dinámico) y un difusor (estático). La potencia requerida y la carga necesaria se la determinan por el número de las etapas de la bomba.

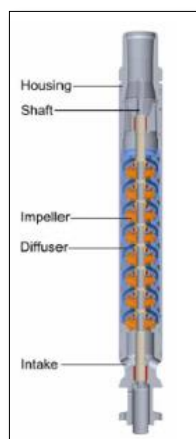


Figura 3.12. Corte de bomba
Fuente: [4]

Las bombas (como se muestra en la Figura 3.13) se fabrican de diferentes materiales ya que esto varía según las condiciones del pozo.

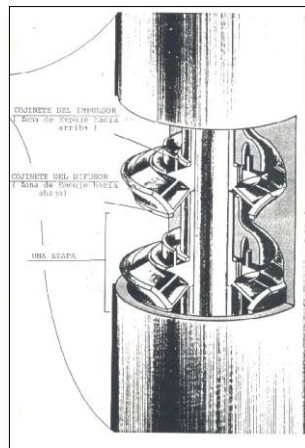


Figura 3.13. Etapa de la bomba
Fuente: [4]

La funcionabilidad de la bomba consiste en la fuerza centrífuga que proporciona el impulsor al girar alrededor del eje aumentando su velocidad secuencialmente el difusor envía el fluido a la siguiente etapa de la bomba para que se realice el cambio de energía cinética en potencial y con ello poder levantar el fluido.

3.3.1.2.2. Separador de gas

Es un elemento del sistema de fondo de la BES (como se muestra en la Figura 3.14), la cual se implementa cuando se tiene pozos con altos volúmenes de gas y su función es de eliminar el gas libre del pozo e impedir que ingrese a la bomba.

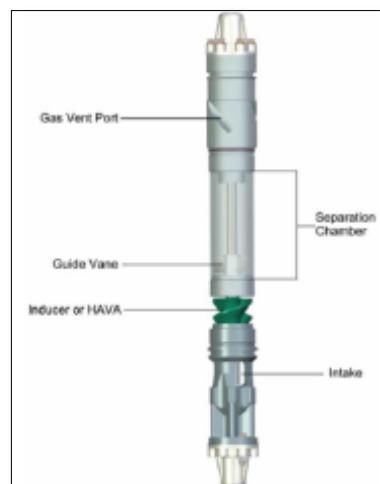


Figura 3.14. Separador de gas
Fuente: [4]

3.3.1.2.3. Sello

Es la parte fundamental del sistema (como se muestra en la Figura 3.15) ya que conecta el motor con la bomba la funcionalidad del sello es evitar la migración del fluido del pozo dentro del motor esto se mitiga a través de una serie de sellos. Otra de las funciones de este

elemento es absorber la expansión del aceite dieléctrico del motor por los gradientes de temperatura.

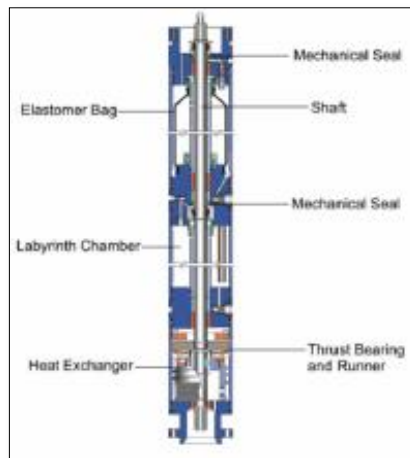


Figura 3.15. Sello

Fuente: [4]

3.3.1.2.4. Motor eléctrico

3.3.1.2.4.1. Motor eléctrico jaula de ardilla

Este motor es eléctrico (como se muestra en la Figura 1.16) del tipo de inducción (jaula de ardilla) el cual se encuentra lleno de aceite, este tipo de motor resiste altos esfuerzos de torsión de arranque permitiendo que llegue a su velocidad de operación en menos de 15 ciclos y con ello se impide la sobrecarga de la línea de alimentación.

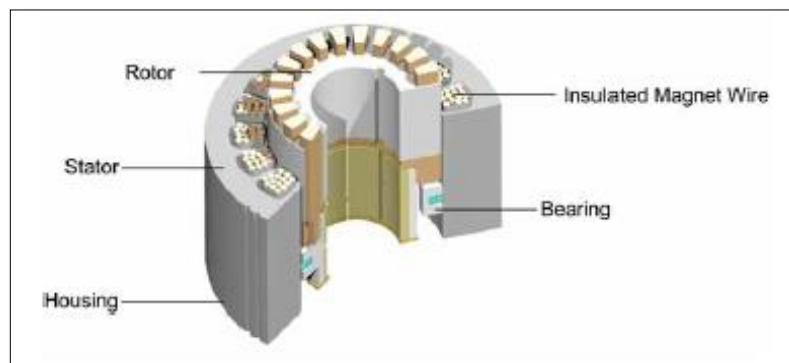


Figura 3.16. Componentes del motor

Fuente: [4]

3.3.1.2.4.2. Motor eléctrico de imán permanente

El motor de imán permanente no es más que un maquina eléctrica que deja de lado la comúnmente llamada jaula de ardilla por un rotor es por ello que este motor posee un deslizamiento nulo considerando que el rotor está diseñado con un material el cual de la un valor agregado a sus propiedades como el trabajo a altas temperaturas y trabajos a altas velocidades.

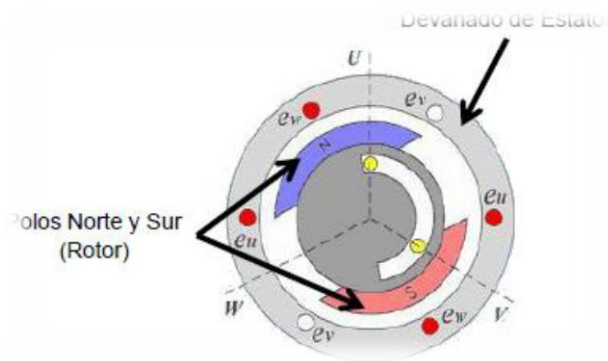


Tabla 3.17. Motor de imán permanente
Fuente: [4]

3.3.1.2.5. Sensor de fondo

Es la parte electrónica que va conectada a la parte inferior del motor sumergible este elemento es primordial (como se muestra en la Figura 3.18), ya que su funcionalidad es la de la evaluación del pozo con datos en tiempo real en la superficie. Este dispositivo es capaz de soportar altas presiones e interpreta temperaturas, succión, vibración, corrientes de fuga y flujo



Figura 3.18. Sensor de fondo
Fuente: [4]

3.4. Datos requeridos del pozo de estudio

El diseño de un sistema de bombeo electrosumergible considerablemente varía, esto se da por las características que presente el fluido a ser extraído a la superficie por lo cual es necesario la mayoría de información disponible del pozo donde se va a realizar el estudio en este caso sería del pozo Cuyabeno 68. La información recopilada es proporcionada por la empresa operadora o dueña del crudo que se encuentra en el pozo del caso de estudio.

Tabla 3.1. Datos de requerimiento del pozo para los dos motores

Datos CYB 68		
Descripción	Motor jaula de ardilla	Motor de imán permanente
Tubería de revestimiento	9 5/8 a 7774 ft	9 5/8 a 7803 ft
Liner	7" a 8935 ft	7" a 8815 ft
Tubería de producción	3.5"	3.5"
Profundidad total del pozo MD	8550 ft	8815 ft
Profundidad de referencia MD	8506 ft	8560 ft
Profundidad de asentamiento de la bomba	8300 ft	8200 ft
Profundidad de la bomba Intake	8297 ft	8175 ft
Producción actual	400 STB	600 STB
Presión estática de fondo – P_r	2850 Psig	2850 Psig
Presión de fondo fluyente – P_{wf}	1600 Psig	1920 Psig
Datos de Producción		
Producción deseada – Q_d	1000 STB	1000 STB
Corte de agua – WC	60 %	40 %
Índice de productividad – IP	0.80 STB/Psig	1.08 STB/Psig
Presión en la cabeza del pozo – P_{wh}	250 Psig	250 Psig
Relación gas petróleo – GOR	300 scf/STB	250 scf/STB
Wellhead Temp	120 °F	120 °F
Temperatura de fondo del pozo – BHT	204 °F	204 °F
Condiciones del fluido		
Gravedad específica del agua – Y_w	1	1
Gravedad API del petróleo	24.5° API	25° API
Gravedad específica del petróleo – Y_0	0.87	0.87
Gravedad específica del gas – Y_g	1.35	1.35
Presión del punto de burbuja – P_b	570 Psig	690 Psig
Fuentes de energía eléctrica		
Voltaje primario	480 V	480 V
Frecuencia	49.7Hz	50Hz

Los datos que se encuentran resaltados de color verde en la Tabla 3.1. Servirán para la elaboración de la simulación del sistema de bombeo electrosumergible en el software de simulación.

4. METODOLOGÍA

Investigación:

Exploratoria.- se delimitó este tipo de investigación ya que se indagó cosas concretas que aún no han sido analizadas.

Experimental.- se realizó una experimentación usando variables tanto con cálculos matemáticos y la ayuda de un software de simulación.

Método:

Deductivo. - permitió delimitar cada uno de los elementos del sistema de bombeo electrosumergible y verificar el tipo de bomba a usar mediante el cálculo del número de etapas.

Analítico.- permitió el análisis del tipo de motor a ser instalado mediante los cálculos matemáticos realizados posteriormente del diseño del sistema para verificar si la instalación será la idónea.

Técnicas:

El planteamiento de ecuaciones.- aportó en la estructuración de la propuesta tecnológica para proceder con el dimensionamiento del sistema.

Instrumentos:

Cálculos matemáticos.- ayudó a delimitar de las ecuaciones necesarias para los cálculos matemáticos

Software de simulación.- mediante el cual se comprobará la veracidad y coincidencias de los cálculos previamente obtenidos.

4.1. Parámetros de los sistemas de bombeo electrosumergible (BES)

4.1.1. Voltaje

Dado que los electrones están distribuidos uniformemente por toda una sustancia se requiere una presión llamada fuerza electromotriz (EMF) para separar los átomos y hacerlos fluir en una dirección definida. Esta fuerza también se llama a menudo potencial o voltaje [3].

4.1.2. Corriente

Cuando se aplica a una sustancia una potencia o tensión de suficiente resistencia, se obtiene un flujo de electrones. Este flujo de electrones se denomina corriente eléctrica. La tasa de este el flujo de corriente se mide en amperios [3].

Un amperio es la velocidad de flujo de la corriente eléctrica representado por el movimiento de una cantidad unitaria de electrones por segundo.

4.1.3. Resistencia

La resistencia puede ser comparada con la fricción encontrada por un flujo de agua a través de un tubo. Una tubería recta, lisa por dentro, conduce agua con poca pérdida de presión. Si la Tubería es áspera en el interior y tiene muchas curvas, la pérdida de presión y la tasa de flujo se verán reducidas en gran medida [3].

De forma similar, un material de baja resistencia permite que la electricidad fluya con pequeña pérdida de tensión; Un material con alta resistencia causa una caída en el voltaje. La energía utilizada para superar la resistencia se convierte en calor.

4.1.4. Ley de Ohm

El voltaje requerido para hacer un flujo de corriente depende de la resistencia del circuito. Un voltaje de un voltio hará que un flujo de un amperio a través de una resistencia de un ohmio [3].

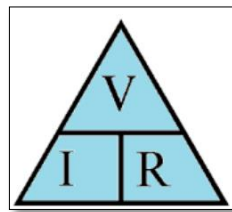


Figura 4.1. Ley de Ohm
Fuente: [5]

4.1.5. Frecuencia

Se define como el número de ciclos realizados en un segundo (como detalla la Formula 4.1). La relación entre la frecuencia generada (f) expresada en Hertz (ciclos por segundo) y la velocidad del rotor (N), expresada en r.p.m., y el número de polos (P) en el motor [3].

$$f = \frac{NP}{120} \quad (4.1)$$

Dónde :

f = Frecuencia generada (Hz)

N = Velocidad del rotor (rpm)

P = Numero de polos del motor

4.1.6. Potencia

En términos eléctricos, representa la energía necesaria para mantener el flujo de corriente (como detalla la Formula 4.2). La potencia eléctrica se mide en Vatios 746 vatios es igual a un caballo de fuerza. Un vatio es una unidad de poder bastante pequeña; por consiguiente, cuando se habla de la potencia requerida por los motores, el término kilovatio (KW) es utilizado, siendo un kilovatio de mil vatios [3].

$$P = VxI \quad (4.2)$$

Dónde:

P = Potencia (W)

V = Voltaje (V)

I = Corriente (A)

4.1.7. Inductancia

Es la acción de la oposición al flujo de corriente AC y en hacer que la corriente retrase el voltaje (como detalla la Formula 4.3); Medido en ohmios y simbolizado por X_L .

$$X_L = 2\pi fL \quad (4.3)$$

En un circuito puramente inductivo la potencia verdadera es cero [3].

4.1.8. Capacitancia

Es la acción de oponerse a la corriente alterna y haciendo que la corriente conduzca el voltaje (como detalla la Formula 4.4); Medido en ohmios y simbolizado por X_C

$$X_C = \frac{1}{2\pi fC} \quad (4.4)$$

En un circuito puramente capacitivo la potencia verdadera es cero.

4.1.9. Impedancia

Es la oposición total que se le presenta al flujo de corriente en un circuito de corriente alterna. Su unidad de medida es el ohmio [3].

4.1.10. Densidad

Es aquella que se define como la masa de una sustancia por unidad de volumen (como detalla la Formula 4.5) y las unidades más usadas son el gramo por centímetro cubico [3].

$$\rho = \frac{m}{v} \quad (4.5)$$

Dónde:

ρ = Densidad (g/cm^3)

m = Masa (g)

v = Volumen (cm^3)

4.1.11. Gravedad del petróleo (SG_0)

Es la interacción de la densidad del petróleo y la densidad de otra sustancia de referencia (como detalla la Formula 4.6) [3].

$$SG_0 = \frac{141.5}{131.5+API} \quad (4.6)$$

Dónde:

SG_o = Gravedad del petróleo (especifica)

API = Gravedad específica del petróleo según (American Petroleum Institute)

4.1.12. Gradiente de presión

Por cada pie de altura se ejerce una presión a lo cual el gradiente de presión del agua dulce es 0.433 psi/pie, por ende, en una columna de agua dulce la presión incrementa de la mano con la profundidad en 0.433 psi por cada pie [3].

4.1.13. Corte de agua (WC)

Es el porcentaje volumétrico de agua en referencia a los otros fluidos que se encuentran en el pozo, se representa en porcentajes.

4.1.14. Presión

Es la acción de apretar la fuerza ejercida en una unidad de área (como detalla la Formula 4.7), se expresa en libras por pulgada cuadrada, (psi) y (Kg/cm²).

$$\textit{presión absoluta} = \textit{presión manométrica} + \textit{presión atmosférica} \quad (4.7)$$

4.1.15. Presión manométrica

Es la presión comúnmente expresada en los manómetros que se encuentran en las válvulas para su respectivo control de presión.

4.1.16. Presión atmosférica

Es la presión que ejerce la atmósfera por una unidad de área considerando que la presión del nivel del mar es 14.7 psi.

4.1.17. Altura de columna

Es el trabajo que debe realizar para movilizar un fluido a una posición requerida de su posición original incluyendo el trabajo para superar la resistencia al movimiento en el conducto del flujo (como detalla la Formula 4.8)

$$\textit{altura de columna} = \frac{\textit{presión}}{0.433 * SG} \quad (4.8)$$

Dónde: Presión (psi)

 Altura de columna (ft)

 SG= gravedad específica del fluido

4.1.18. Presión a la entrada de bomba (PIP)

Es aquel valor que se estima al obtener el gradiente del fluido y la gravedad específica del mismo.

4.1.19. PIP requerido

Presión con la que el fluido debe ingresar a la bomba para evitar bloqueo por gas o cavitación.

4.1.20. Presión de burbuja

Es la liberación de la primera burbuja de gas del fluido del petróleo y se determina en función a la temperatura, gravedad específica del gas, gravedad específica del petróleo y la cantidad de gas en solución con el petróleo (R_s).

4.1.21. Relación gas petróleo (GOR)

Representa la relación entre el volumen total del gas y el volumen total del petróleo (como muestra la Figura 4.2) producido por día considerando su constancia a lo largo de la tubería.

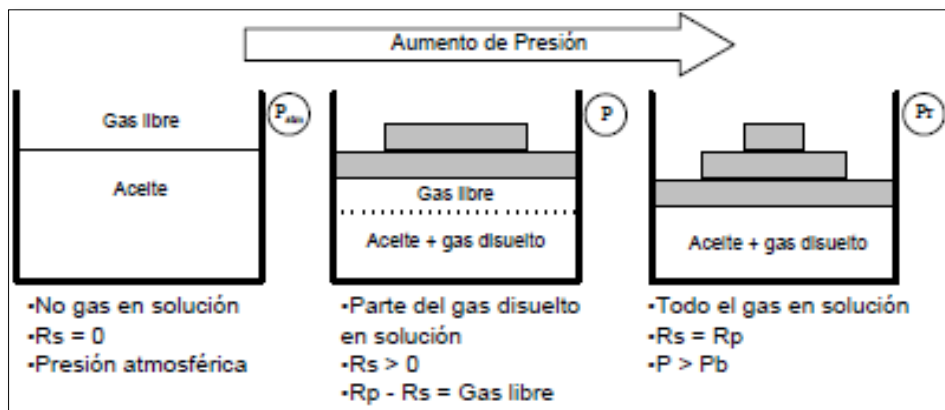


Figura 4.2. Comportamiento del gas

Fuente: [6]

4.1.22. Factor volumétrico del petróleo (β_o)

Mediante condiciones de presión, temperatura y volumen de petróleo en superficie de condición estándar se define el factor volumétrico de petróleo. En superficie el volumen será menor por la liberación del gas [1].

4.1.23. Viscosidad (μ)

Es la relación entre la viscosidad absoluta y la densidad o la resistencia del flujo al movimiento (como detalla la Formula 4.9).

$$v = \frac{\mu}{\rho} \quad (4.9)$$

Dónde:

v = Viscosidad cinemática (cSt)

μ = Viscosidad dinámica (cP)

ρ = Densidad (g/cm^3)

4.1.24. Caudal

Es la cantidad de fluido que circula a través de un conducto de un área determinada considerando la velocidad del mismo (como detalla la Formula 4.10) [7].

$$Q = A * V \quad (4.10)$$

Dónde:

Q = Capacidad (pies cúbicos por segundo)

A = Área del conducto (pies cuadrados)

V = Velocidad del flujo (pies por segundo)

4.1.25. Fricción de la tubería

Mediante Hazzen-Williams se define la fricción de la siguiente ecuación (como detalla la Formula 4.11) [2].

$$Friccion = \left[\frac{V}{1.32C \left(\frac{D}{48}\right)^{0.63}} \right]^{0.54} * \text{profundidad de bomba} \quad (4.11)$$

Dónde:

Fricción = Perdida por fricción en la tubería (pies)

V = Velocidad del fluido (pies/segundo)

D = Diámetro interno de la tubería (pulgadas)

C = Coeficiente de fricción

100 tubería vieja (>10años)

120 tubería nueva (<10 años)

130 tuberías de fibra de vidrio

140 tubería de plástico recubierta

4.2. Dimensionamiento de un sistema de bombeo electrosumergible

4.2.1. Índice de Productividad

Es la contante de proporcionalidad que mide la productividad del pozo [8]

$$IP = \frac{Q_d}{P_r - P_{wf}} \quad (4.12)$$

Dónde:

Q_d = Caudal deseado (STB)

P_r = Presión estática del yacimiento (Psig)

P_{wf} = Presión de fondo fluyente (Psig)

$$IP = \frac{1000}{2850 - 1600} = 0.8 \frac{STB}{psig}$$

4.2.2. Caudal máximo para $P_{wf}=0$ con IP constante

$$Q_{max} = IP * (P_r - 0) \quad (4.13)$$

Dónde:

Q_{max} = Caudal a P_b (STB/día)

IP = Índice de productividad (STB/Psig)

P_r = Presión estática del yacimiento (psig)

$$Q_{max} = 0.8 * (2850 - 0) = 2280 \frac{STB}{dia}$$

4.2.3. Caudal correspondiente a P_b

$$Q_b = IP * (P_r - P_b) \quad (4.14)$$

Dónde:

Q_b = caudal correspondiente a P_b (STB/día)

IP = Índice de productividad (STB/psig)

P_r = Presión estática de yacimiento (psig)

P_b = Presión de punto de burbuja (psig)

$$Q_b = 0.8 * (2850 - 570) = 1824 \frac{STB}{dia}$$

4.2.4. Caudal máximo

$$Q_{max} = Q_b + \frac{IP * P_b}{1.8} \quad (4.15)$$

Dónde:

Q_{max} = Caudal máximo (STB/día)

Q_b = Caudal correspondiente a P_b (STB/día)

IP = Índice de productividad (STB/psig)

P_b = Presión de punto de burbuja (psig)

$$Q_{max} = 1824 + \frac{0.8 * 570}{1.8} = 2077 \frac{STB}{dia}$$

Es necesario determinar la gravedad específica del fluido por el alto corte de agua WC que se tiene en el pozo como dato de información inicial [6].

$$SG_L = (SG_0 * \%Petroleo) + (SG_w * \%Agua) \quad (4.16)$$

Dónde:

SG_L = Gravedad específica del fluido compuesto

SG_0 = Gravedad específica del petróleo

SG_w = Gravedad específica del agua

$$SG_L = \left(0.87 * \frac{40}{100}\right) + \left(1.00 * \frac{60}{100}\right) = 0.95$$

4.2.5. Presión a la entrada de la bomba (PIP)

$$PIP = P_{wf} - \left(\frac{(H_R - H_B) * SG_L}{2.31}\right) \quad (4.17)$$

Dónde:

PIP = Presión a la entrada de la bomba (psig)

P_{wf} = Presión de fondo fluyente (psig)

H_R = Profundidad de referencia (ft)

H_B = Profundidad de la bomba (ft)

SG_L = Gravedad específica del fluido compuesto

$$PIP = 1600 - \left(\frac{(8506 - 8300) * 0.95}{2.31}\right) = 1515 \text{ psig}$$

4.2.6. Cálculo del gas

Cálculo de cantidad de gas en solución R_s

$$R_s = SG_g \left(\frac{P_b}{18} - \frac{10^{0.0125 * API}}{10^{0.000917 * T}}\right)^{1.2048} \quad (4.18)$$

Dónde:

R_s = Gas en solución con el petróleo (scf/STB)

P_b = Presión de punto de burbuja (psig)

SG_g = Gravedad específica del gas

$$R_s = 1.35 \left(\frac{570}{18} - \frac{10^{0.0125 * 24.5}}{10^{0.000917 * 204}}\right)^{1.2048} = 82.42 \frac{\text{scf}}{\text{STB}}$$

Cantidad de gas en solución a la entrada de la bomba

$$GOR_{pump} = SG_g \left(\frac{PIP}{18} - \frac{10^{0.0125 * API}}{10^{0.000917 * T}}\right)^{1.2048} \quad (4.19)$$

Dónde:

GOR_{pump} = Relación gas-petróleo a la entrada de la bomba (scf/STB)

SG_g = Gravedad específica del gas

$$GOR_{pump} = 1.35 \left(\frac{1515}{18} - \frac{10^{0.0125*24.5}}{10^{0.000917*204}} \right)^{1.2048} = 111.85 \frac{scf}{STB}$$

4.2.7. Cálculos de factores volumétricos

Factor volumétrico del agua (B_w)

$$\beta_w = 1 + 1.2 * 10^{-4}(T - 60) + 1 * 10^{-6}(T - 60)^2 - 3.33 * 10^{-6}P \quad (4.20)$$

Dónde:

β_w = Factor volumétrico del agua (BLS/STB)

T = Temperatura del yacimiento (°F)

P = Presión a la entrada de la bomba (psig)

$$\begin{aligned} \beta_w &= 1 + 1.2 * 10^{-4}(204 - 60) + 1 * 10^{-6}(204 - 60)^2 - 3.33 * 10^{-6} * 1515 \\ &= 1.033 \frac{BLS}{STB} \end{aligned}$$

Factor volumétrico del petróleo (B_0)

$$\beta_0 = 0.972 + 0.000147 * F^{1.175} \quad (4.21)$$

Dónde:

$$F = GOR_{pump} * \left(\frac{Y_g}{Y_0} \right)^{0.5} + 1.25 * T \equiv 1515 \left(\frac{1.35}{0.87} \right)^{0.5} + 1.25 * 204 = 2142$$

$$\beta_0 = 0.972 + 0.000147 * 2142^{1.175} = 2.18 \frac{BLS}{STB}$$

Factor volumétrico del gas (B_g)

$$\beta_g = \frac{5.04 * Z * T}{P} \quad (4.22)$$

Dónde:

β_g = Factor volumétrico del gas (BLS/mcf)

Z = Factor de compresibilidad del gas (0.85)

T = Temperatura en grados Rankine (°R)

P = Presión a la entrada de la bomba (psia)

mcf = Miles de pies cúbicos de gas en condiciones estándar

$$\beta_g = \frac{5.04 * 0.85 * (204 + 460)}{1515 + 14.7} = 1.85 \frac{BLS}{mcf}$$

4.2.8. Cantidad de gas total producido

$$Gas\ total = \frac{Q_0 * GOR}{1000} \quad (4.23)$$

Dónde:

Q_0 = Caudal del petróleo (STB)

GOR = Relación gas-petróleo (scf/STB)

$Q_d = 1000$ STB

$Q_0 = 600$ STB

$Q_w = 400$ STB

$$Gas\ total = \frac{600 * 300}{1000} = 180\ mcf$$

4.2.9. Cantidad de gas en solución en la entrada de la bomba

$$Gas\ en\ solucion = \frac{Q_0 * GOR_{pump}}{1000} \quad (4.24)$$

Dónde:

Q_0 = caudal del petróleo (STB)

GOR_{pump} = Relación gas – petróleo a la entrada de la bomba (scf/STB)

$$Gas\ en\ solucion = \frac{600 * 111.85}{1000} = 67\ mcf$$

4.2.10. Gas libre

$$Gas\ libre = Gas\ total - Gas\ en\ solucion \quad (4.25)$$

Dónde:

mcf = miles de pies cúbicos de gas en condiciones estándar

$$Gas\ libre = 180 - 67 = 113\ mcf$$

4.2.11. Volumen total a la entrada de la bomba

Volumen del petróleo V_0

$$V_0 = Q_0 * \beta_0 \quad (4.26)$$

Dónde:

V_0 = Volumen de petróleo (BLS)

Q_0 = Caudal del petróleo (STB)

β_0 = Factor volumétrico del petróleo (BLS/STB)

$$V_0 = 600 * 2.18 = 1308\ BLS$$

Volumen de gas V_g

$$V_g = Gas\ libre * \beta_g \quad (4.27)$$

Dónde:

V_g = Volumen de gas (BLS)

Gas libre (mcf)

β_g = Factor volumétrico del gas (BLS/mcf)

$$V_g = 113 * 1.85 = 209 \text{ BLS}$$

Volumen del agua V_w

$$V_w = Q_w * \beta_w \quad (4.28)$$

Dónde:

V_w = Volumen de agua (BLS)

Q_w = Caudal de agua (STB)

β_w = Factor volumétrico de agua (BLS/STB)

$$V_w = 400 * 1.033 = 413 \text{ BLS}$$

Volumen de fluido total a la entrada de bomba (V_t)

$$V_t = V_0 + V_g + V_w \quad (4.29)$$

Dónde:

V_t = Volumen total de fluido (BLS)

V_0 = Volumen de petróleo (BLS)

V_g = Volumen de gas (BLS)

V_w = Volumen de agua (BLS)

$$V_t = 1308 + 209 + 413 = 1930 \text{ BLS}$$

4.2.12. Porcentaje de gas libre a la entrada de la bomba (%)

$$\%Gas \text{ libre} = \frac{V_g}{V_t} * 100 \quad (4.30)$$

Dónde:

V_g = Volumen de gas (BLS)

V_t = Volumen total de fluido (BLS)

$$\%Gas \text{ libre} = \frac{209}{1930} * 100 = 10.8 \%$$

Sera de opción despreciable la instalación de un separador de gas dependiendo de la cantidad de gas libre en el yacimiento pero para esta aplicación la bomba multiphase es efectiva y se calcula de la siguiente manera:

4.2.13. Volumen real ingerido por la bomba

Eficiencia de 90% en la bomba

$$V_{gn} = \text{Volumen de gas en la entrada} * 0.1 \quad (4.31)$$

Dónde:

V_{gn} = Volumen de gas real ingerido por la bomba (BLS)

$$V_{gn} = 205 * 0.1 = 21 \text{ BLS}$$

Volumen total de fluido que ingresa a la bomba

$$V_{tn} = V_0 + V_{gn} + V_w \quad (4.32)$$

Dónde:

V_{tn} = Volumen total de fluido ingerido por la bomba (BLS)

V_0 = Volumen de petróleo (BLS)

V_w = Volumen de agua (BLS)

$$V_{tn} = 1308 + 21 + 413 = 1742 \text{ BLS}$$

Gas libre que realmente ingresa a la bomba (GIP)

$$\%Gas \text{ libre}_n = \frac{V_{gn}}{V_{tn}} * 100 \quad (4.33)$$

Dónde:

$\%Gas \text{ libre}_n$ = Gas libre real ingerido por la bomba (%)

V_{gn} = Volumen real de gas ingresado a la bomba (BLS)

V_{tn} = Volumen total de fluido ingerido por la bomba (BLS)

$$\%Gas \text{ libre}_n = \frac{21}{1742} * 100 = 1.20 \%$$

4.2.14. Relación gas – petróleo en la tubería (GOR_{th})

Gas en la tubería

$$\text{Gas en la tubería} = \text{Gas en solución} + \text{Gas libre no separado} \left(\frac{V_g}{\beta_g} \right) \quad (4.34)$$

Dónde:

Gas en la tubería (mcf)

V_{gn} = Volumen de gas ingerido por la bomba (BLS)

β_g = Factor volumétrico del gas (BLS/mcf)

$$\text{Gas en la tubería} = 67 + \left(\frac{21}{1.85} \right) = 78 \text{ mcf}$$

Calculo de GOR_{tb}

$$GOR_{tb} = \frac{\text{Gas en la tubería} * 1000}{Q_o} \quad (4.35)$$

Dónde:

GOR_{tb} = Relación gas – petróleo en la tubería (scf/STB)

Gas en la tubería (mcf)

Q_o = Caudal de petróleo (STB)

$$GOR_{tb} = \frac{78 * 1000}{600} = 130 \frac{scf}{STB}$$

4.2.15. Cálculo de la gravedad específica (SG_{mix})

Para proceder con el cálculo de SG_{mix} necesitamos encontrar la masa total del fluido producido [9].

$$TMPF = [(Q_o * SG_o + Q_w * SG_w) * 62.4 * 5.6146] + [GOR_{tb} * Q_o * SG_g * 0.0752] \quad (4.36)$$

Dónde:

Q_o = Caudal de petróleo (STB)

SG_o = Gravedad específica del petróleo

Q_w = Caudal de agua (STB)

SG_w = Gravedad específica del agua

GOR_{tb} = Relación gas – petróleo en la tubería (scf/STB)

$$\begin{aligned} TMPF &= [(600 * 0.87 + 400 * 1) * 62.4 * 5.6146] + [130 * 600 * 1.35 * 0.0752] \\ &= 330942 \frac{lbs}{d} \end{aligned}$$

Gravedad específica compuesta de fluidos

$$SG_{mix} = \frac{\text{Masa total de fluido producido (TMPF)}}{V_t * 5.6146 * 62.4} \quad (4.37)$$

Dónde:

SG_{mix} = Gravedad específica compuesta de fluidos

$TMPF$ = Masa total de fluido producido (LBS/día)

V_{tn} = Volumen total de fluido (BLS)

$$SG_{mix} = \frac{330942}{1930 * 5.6146 * 62.4} = 0.4894$$

Densidad de fluido compuesto

$$\rho_{mix} = SG_{mix} * 0.9990 \frac{g}{cm^3} \quad (4.38)$$

Dónde:

ρ_{mix} = Densidad del fluido compuesto (g/cm³)

SG_{mix} = Gravedad especifica compuesta de fluidos

$$\rho_{mix} = 0.4894 * 0.9990 = 0.4889 \frac{g}{cm^3}$$

4.2.16. Cabeza dinámica total

Cálculo del THD

$$THD = H_d + F_t + P_d \quad (4.39)$$

Dónde:

THD = Cabeza dinámica total (ft)

H_d = Altura neta vertical (ft)

F_t = Perdidas por fricción (ft)

P_d = Presión de descarga de la tubería de producción (ft)

$$THD = 1149 + 855 + 1180 = 3184 \text{ ft}$$

Es la altura total requerida para bombear la capacidad de fluido deseada. Para proceder con el cálculo de la cabeza dinámica total (THD) [10] necesitamos encontrar las siguientes variables:

Altura vertical neta (H_d)

$$H_d = \text{Profundidad de la bomba} - \left(\frac{PIP * 2.31}{SIG_{mix}} \right) \quad (4.40)$$

Dónde:

H_d = Altura neta vertical (ft)

Profundidad de la bomba (ft)

PIP = Presión a la entrada de la bomba (psig)

SG_{mix} = Gravedad especifica compuesta de fluidos

$$H_d = 8300 - \left(\frac{1515 * 2.31}{0.4894} \right) = 1149 \text{ ft}$$

Pérdida por fricción (F_t)

$$F_t = \frac{\text{Profundidad de la bomba} * \text{Perdidas de fricción}}{1000} \quad (4.41)$$

Dónde:

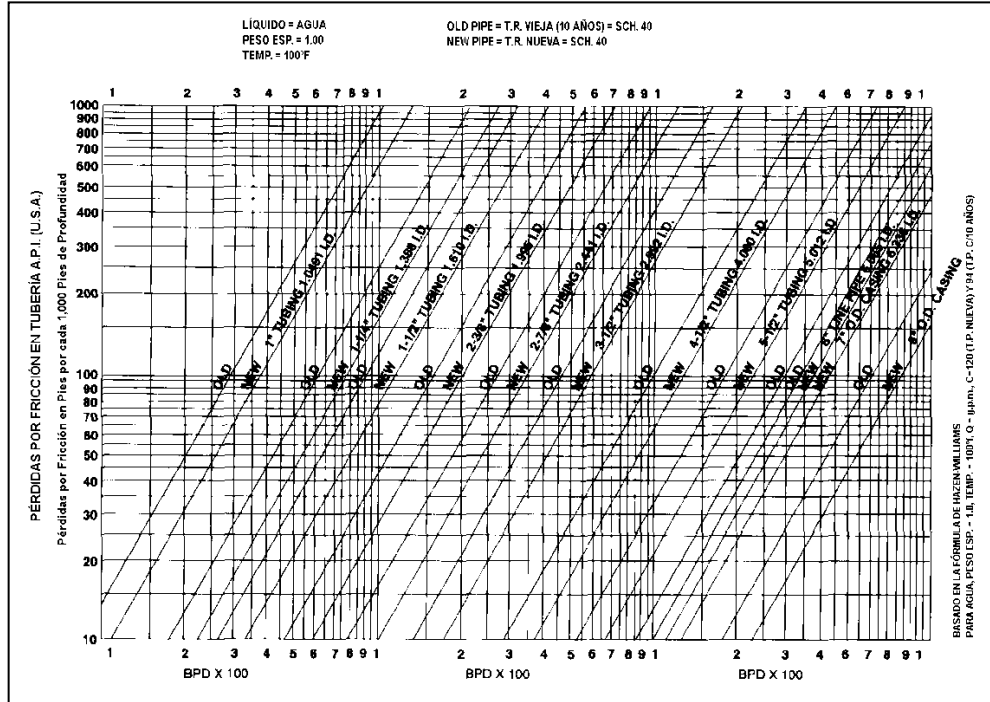
Profundidad de la bomba (ft)

Pérdidas de fricción (ft)

$$F_t = \frac{8300 * 103}{1000} 855 ft$$

Las pérdidas por fricción son obtenidas por la tabla 4.1

Tabla 4.1. Grafica de pérdidas por fricción



Presión de descarga de la tubería de producción (P_d)

$$P_d = \frac{\text{Presión en el cabezal} * 2.31}{SG_{mix}} \tag{4.42}$$

Dónde:

P_d = Presión de descarga de la tubería de producción (ft)

SG_{mix} = Gravedad específica compuesta de fluidos

$$P_d = \frac{250 * 2.31}{0.4894} = 1180 ft$$

4.2.17. Número de etapas de la bomba

$$N^\circ \text{ etapas} = \frac{TDH}{\text{cabeza/etapa}} \tag{4.43}$$

Dónde:

TDH = Cabeza dinámica total (ft)

$$N^{\circ} \text{ etapas} = \frac{3184}{15.0} = 212$$

4.2.18. Cálculo de potencia de freno

4.2.18.1. Factor frecuencia k

$$k = \frac{f_x}{f_n} \quad (4.44)$$

Dónde:

k = Factor frecuencia

f_x = Frecuencia operacional (Hz)

f_n = Frecuencia nominal (Hz)

$$k = \frac{60}{45} = 4$$

4.2.18.2. HP requeridos del motor

$$BHP_{motor} = (n * N_{max.stg} * \rho_{mix} * k^2) * 1.1 \quad (4.45)$$

Dónde:

BHP_{motor} = Potencia requerida por el motor (HP)

n = Número de etapas de la bomba

$N_{max.stg}$ = Máximo poder por etapa (HP/stage)

ρ_{mix} = Densidad compuesta de los fluidos (g/cm³)

k = Factor de frecuencia

$$BHP_{motor} = \left(212 * 0.58 * 0.4889 * \left(\frac{60}{45} \right)^2 \right) * 1.1 = 117 \text{ HP}$$

4.2.19. Consumo energético del sistema BES

4.2.19.1. Costo del consumo energético del sistema BES con SCE o PMM

$$\frac{Kw}{h} = HP_{PMM \text{ ó } SCE} * 0.7457 \quad (4.46)$$

Dónde:

$\frac{Kw}{h}$ = kilowatios-hora consumidos por el motor (kw/h)

HP_{PMM} = Potencia consumida por el motor (HP)

$$\frac{Kw}{h} = 117 * 0.7457 = 87$$

4.2.19.2. Costo del consumo de energía del sistema al año con SCE o PMM al año

$$CCE_{PMM \text{ ó } SCE} = 0.07 * \frac{kw}{h} * 24 * (365 - (MTTR * TF)) \quad (4.47)$$

Dónde:

$CCE_{PMM \text{ ó } MJA}$ = Costo de consumo de energía del sistema (usd/año)

$\frac{kw}{h}$ = kilowatios-hora consumidos por el motor (kw/h)

$MTTR$ = Mean Time To Repair (días)

TF = Tasa de falla

Para determinar fundamentalmente los costos de energía se deberá considerar los siguientes factores estadísticos:

MTTR (Mean Time to Repair)

Promedio de días para solucionar una determinada falla del sistema. El MTTR para los dos sistemas en estudio en un año es de seis días.

TF (Tasa de falla)

La TF es el número de fallas ocurridas en un año en el sistema para el sistema de BES con motor de imán permanente es cero puesto que el run-line de los equipos supera los 12 meses, mientras que para el sistema con motor jaula de ardilla es de 2 veces al año como promedio [11].

$$CCE_{SCE} = 0.07 * 87 * 24 * (365 - (6 * 2)) = 51\ 594 \text{ USD/año}$$

4.2.20. Calculo de KVA del sistema

$$KVA = \frac{\text{Voltaje en superficie} * \text{Amperios del motor} * 1.73}{1000} \quad (4.48)$$

$$KVA = \frac{1358 * 30.2 * 1.73}{1000} = 71$$

4.3. Software de simulación

Se implementó en este estudio comparativo la ayuda de un software de simulación de sistemas de levantamiento artificial el cual aportará con la validación de los datos obtenidos mediante cálculos matemáticos realizados en la presente propuesta. El software de simulación dispone de un módulo totalmente completo que sirve únicamente para el diseño de sistemas de bombeo electrosumergible.

Considerando que las cualidades del software se basan en tres parámetros fundamentales que son: el dimensionamiento, la simulación y la optimización utilizando datos reales del pozo los cuales facilitan la vida del equipo y el tiempo del ingeniero de campo. A lo cual hay que considerar que la recopilación de información de los datos del pozo debe ser precisa para que el dimensionamiento sea exitoso.

5. ANALISIS DE RESULTADOS

5.1. Resultados obtenidos

Los resultados que se encuentran en la siguiente tabla son aquellos que se obtuvo de los cálculos matemáticos aplicando las ecuaciones que se encuentran estipuladas en la metodología.

Tabla 5.1. Resultados de variables calculadas

Variables calculadas			
Tipo de Motor	SCE	PMM	Unidad
Índice de Productividad (IP)	0.8	1.08	STB/psig
Presión estática del yacimiento (Pr)	2850	2850	psig
Presión de fondo fluyente (Pwf)	1600	1920	psig
Tasa de flujo deseado (Qd)	1000	1000	STB
Corte de Agua (W.C.)	60	40	%
Presión en la cabeza de pozo (Pwh)	250	250	psig
Presión a la entrada de la bomba (PIP)	1515	1776	psig
Relación gas petróleo (GOR)	300	250	scf/STB
Gravedad específica del petróleo (SGo)	0.87	0.87	
Gravedad específica del agua (SGw)	1	1	
Gravedad específica del gas (SGg)	1.35	1.35	
Volumen total de gas producido	180	150	mcf
Volumen de gas libre	113	98	mcf
Gas en solución	67	52	mcf
Porcentaje de gas libre a la entrada de la bomba	10.8	12.32	%
Volumen de petróleo a la entrada de la bomba (Vo)	1308	684	BLS
Volumen de gas libre a la entrada de la bomba (Vg)	209	154	BLS
Volumen de agua a la entrada de la bomba (Vw)	413	412	BLS
Volumen total de fluido a la entrada de la bomba (Vt)	1930	1250	BLS
Masa total de fluidos producidos (TMPF)	330942	329175	LBS/día
Gravedad específica compuesta (SGmix)	0.4894	0.8456	
Cabeza dinámica total (TDH)	3184	4876	Ft
Pérdida por fricción en tubería (Ft)	855	845	Ft
Altura neta (Hd)	1149	3348	Ft
Contrapresión (Pd)	1180	683	Ft
No. Etapas	212	102	
BHP del motor	117	31	HP
Consumo de energía al año	51594	14301	USD/año
Potencia del sistema	71	58	KVA

5.2. Simulación en Software

5.2.1. Procedimiento de ingreso de datos generales para el diseño.

El proceso de simulación será detallado a continuación paso a paso para lograr una mejor comprensión considerando que se utilizara parámetros operacionales reales del pozo Cuyabeno 68.

- ✓ Bombeo mecánico
- ✓ Bombeo hidráulico
- ✓ Cavidad progresiva
- ✓ Gas lift
- ✓ Bombeo electrosumergible

Para nuestro caso de estudio sería el sistema de bombeo electrosumergible como alternativa de levantamiento artificial para la extracción de crudo del pozo Cuyabeno 68 ya sea con motor de inducción o motor de imán permanente. Considerando que el sistema BES es el más usado en los pozos petroleros a nivel mundial es por ello que de un excelente dimensionamiento radica la adjudicación de un contrato.

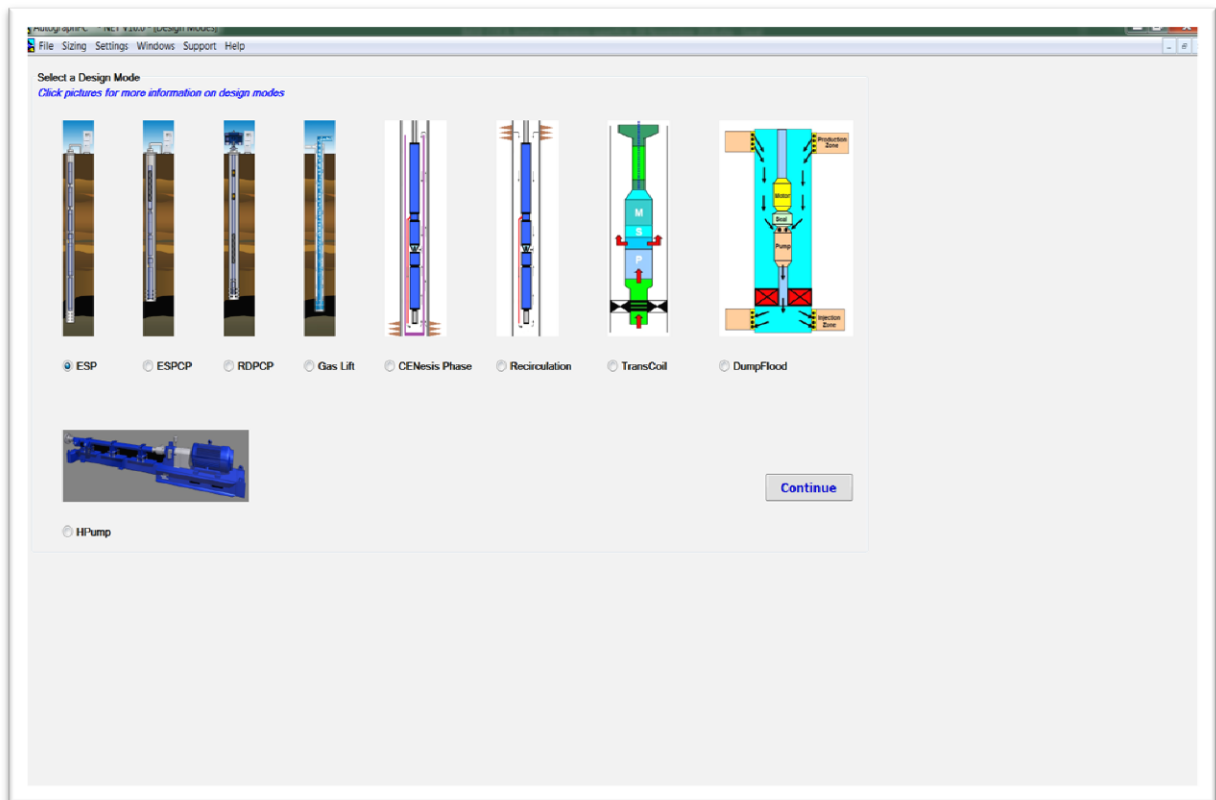


Figura 5.2. Portada para selección del sistema de ALS

Fuente: BHI – ALS – Autograph PC Student Guide

En la Figura 5.3. Se muestra una hoja de trabajo en blanco en la cual se procede a simular el caso de estudio hay que considerar que para iniciar la simulación de cualquier tipo de sistema BES debemos necesariamente tener toda la información disponible del pozo es por ello que esta información la deberá proporcionada la empresa dueña del pozo Cuyabeno 68.

Los requerimientos operacionales para este caso se encuentran específicamente en la *Tabla 3.1*. estas especificaciones serán de mucha utilidad ya que las mismas servirán para todo el proceso de simulación o dimensionamiento del sistema.

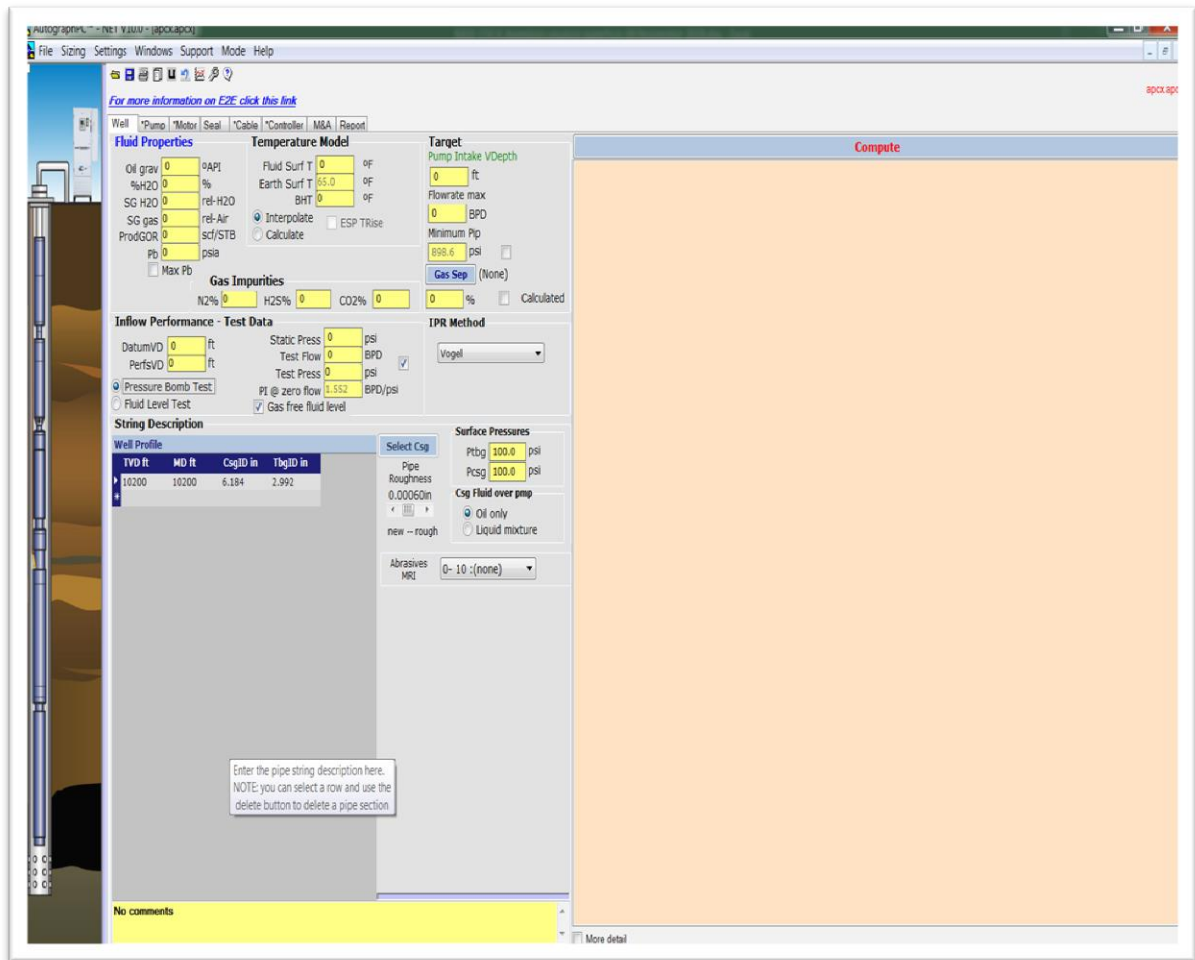


Figura 5.3. Portada para ingreso de datos operacionales del pozo
Fuente: BHI – ALS – Autograph PC Student Guide

En la Figura 5.4. Detalla un factor importante para la simulación el cual es las propiedades de los fluidos los mismos que deberán ser considerados para dimensionar el sistema de la manera más adecuada, a continuación se detalla y explica cada uno de los datos requeridos en este procedimiento.

- ✓ **Oil grav:** Es la densidad de los hidrocarburos los mismos que se miden en grados.
- ✓ **% H2O:** el corte de agua es porcentaje de agua que se encuentran en los fluidos producidos en superficie.
- ✓ **SG H2O:** Es la gravedad específica del agua es la medida de su densidad y para el caso del agua es uno.
- ✓ **SG gas:** Es la gravedad específica del gas y es la relación de la densidad de la mezcla de gas a la del aire.
- ✓ **ProdGOR:** Es la relación de producción gas – petróleo que se estima como el volumen diario de gas producido.
- ✓ **Pb:** Es la presión más lata a la que se aplica una burbuja de gas.

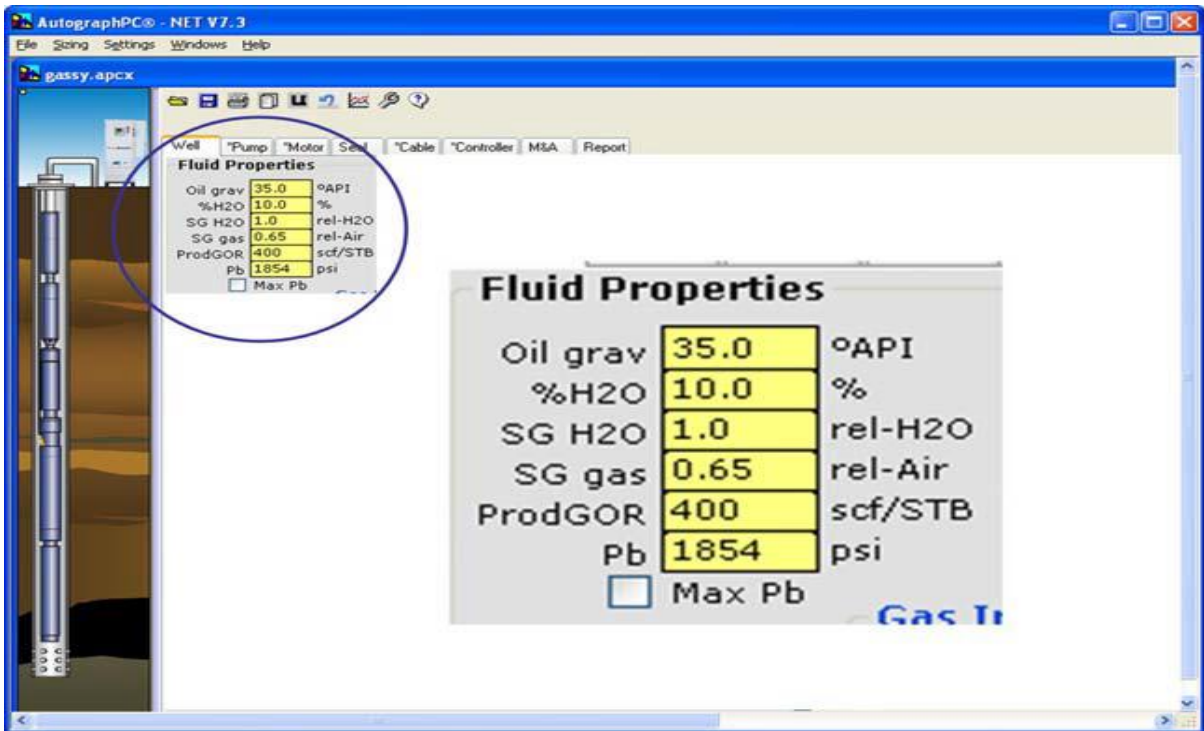


Figura 5.4. Portada para ingreso de datos de propiedades del fluido

Fuente: BHI – ALS – Autograph PC Student Guide

La Figura 5.5. Muestra la sección del modelado de la temperatura del sistema a la cual se va a dimensionar. A continuación se detalla y explica cada uno de los datos requeridos en este procedimiento.

- ✓ **Fluid surf T:** Es la temperatura ambiente de superficie de la locación
- ✓ **Earth surf T:** Es una temperatura constante.
- ✓ **BHT:** Es la temperatura inferior de asentamiento de la bomba en el pozo.

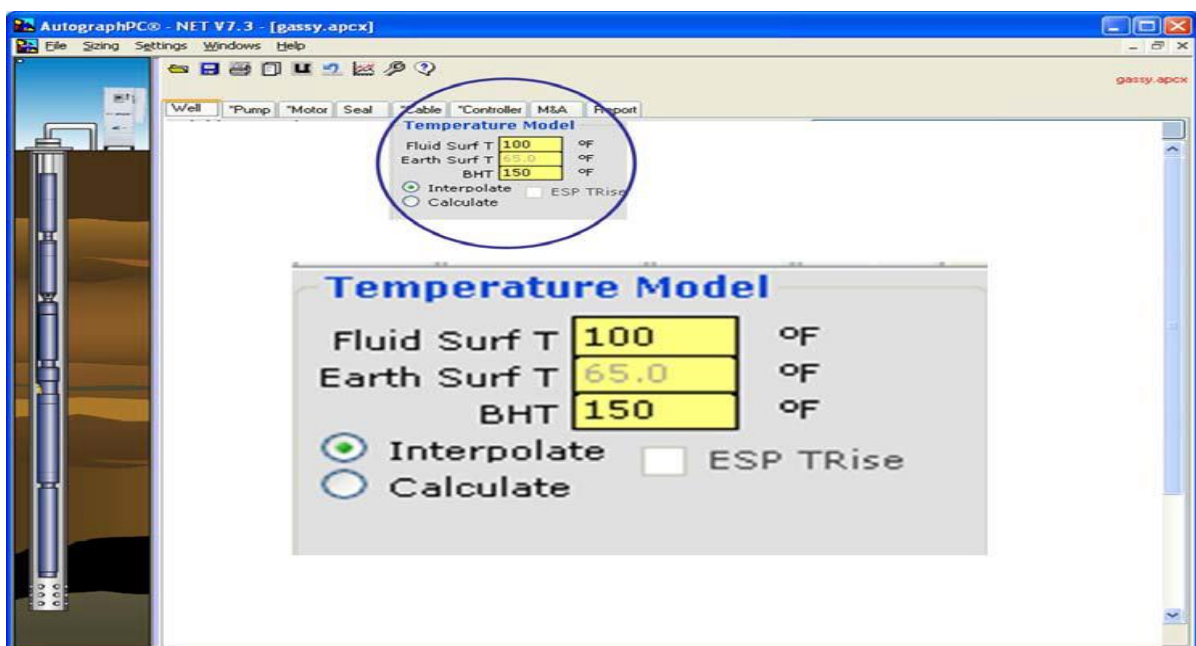


Figura 5.5. Portada para ingreso de temperatura del modelo de estudio

Fuente: BHI – ALS – Autograph PC Student Guide

La Figura 5.6. muestra los datos de prueba rendimiento del nivel de fluido para el sistema de estudio en este caso sería los proporcionados por para el pozo Cuyabeno 68. A continuación se detalla y explica cada uno de los datos requeridos en este procedimiento.

- ✓ **Datum VD:** Es la profundidad a la cual fue realizada la prueba de presión.
- ✓ **Perfs VD:** Es la profundidad vertical considerada a partir de una referencia de superficie.
- ✓ **Stactic Press:** Es la lectura de la presión a profundidad vertical con un caudal cero.
- ✓ **Test flow:** Es el flujo de barriles a la presión de prueba.
- ✓ **Test press:** Es la presión que fluye a la profundidad vertical.

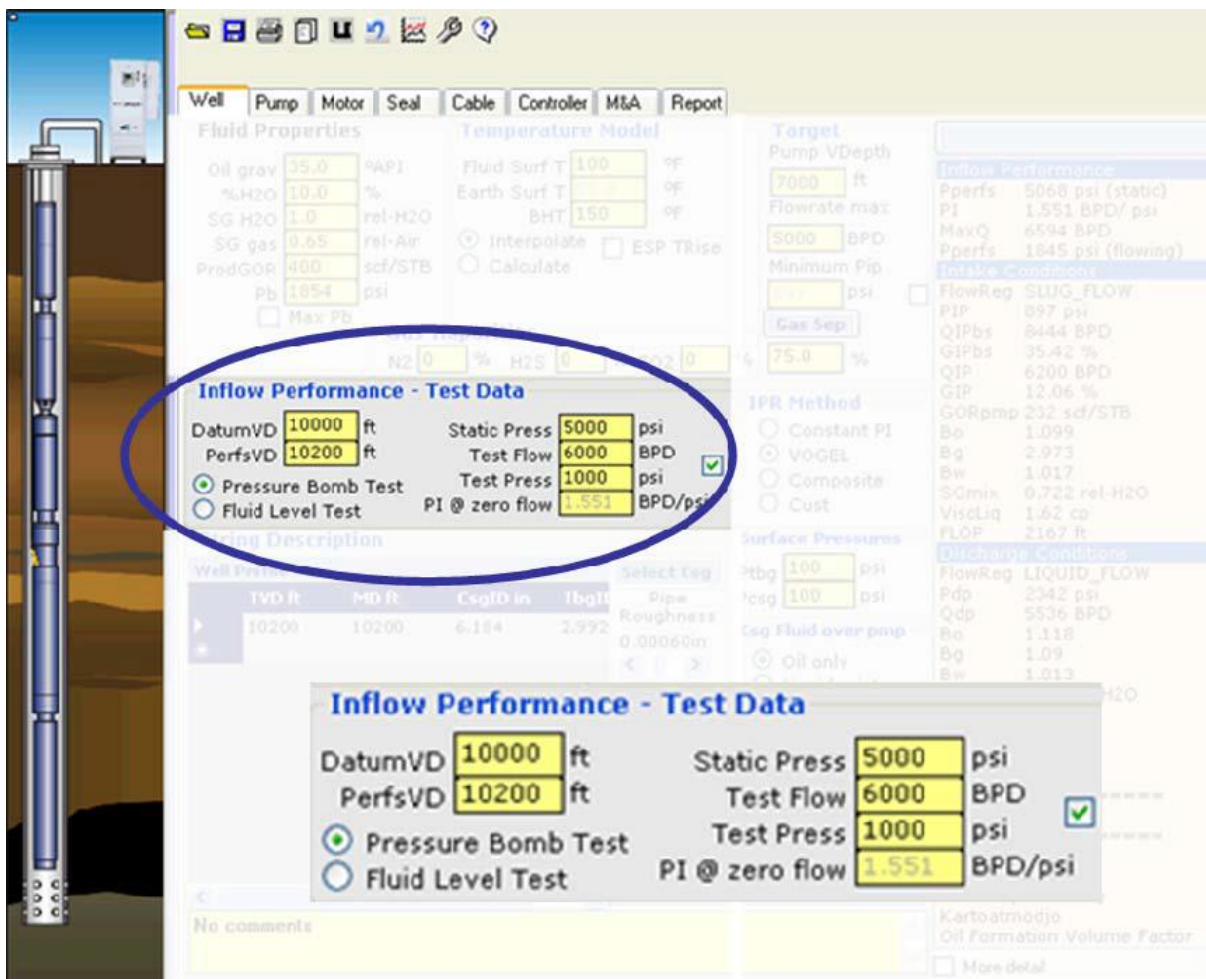


Figura 5.6. Portada para ingreso de rendimiento de entrada de BES

Fuente: BHI – ALS – Autograph PC Student Guide

La Figura 5.7. Muestra la sección objetiva del sistema es decir a donde queremos llegar considerando que aquí hay un dato importante el cual es el asentamiento de la bomba conocido como Pump Intake MD. A continuación se detalla y explica cada uno de los datos requeridos en este procedimiento.

- ✓ **Pump VDepth:** Es la profundidad total a la cual se ajusta la bomba al sistema BES
- ✓ **Flowrate max:** Es el caudal máximo deseado para el sistema BES.

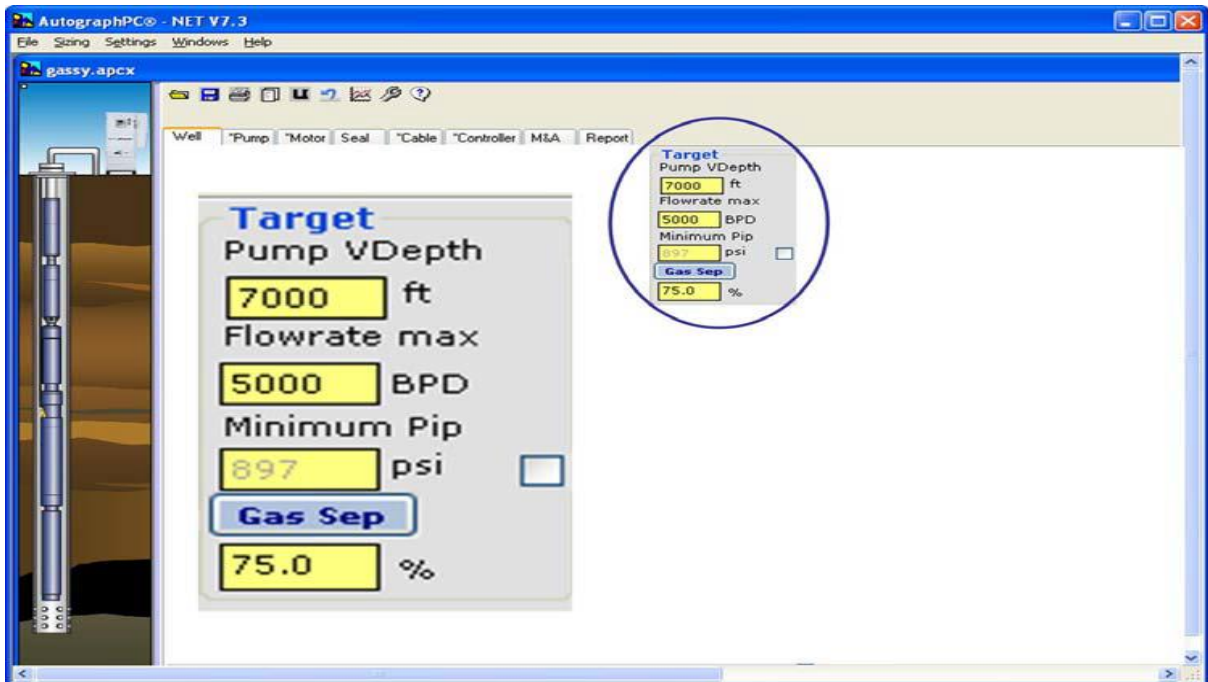


Figura 5.7. Portada para ingreso del objetivo del sistema BES
Fuente: BHI – ALS – Autograph PC Student Guide

En la Figura 5.8. Muestra los datos transitorios de perforación conforme va avanzando la sarta de perforación estos son ingresados para que el software procese la información en superficie. A continuación se detalla y explica cada uno de los datos requeridos en este procedimiento.

- ✓ **TVD:** Es la profundidad vertical total del pozo.
- ✓ **MD:** Es la profundidad medida del pozo.

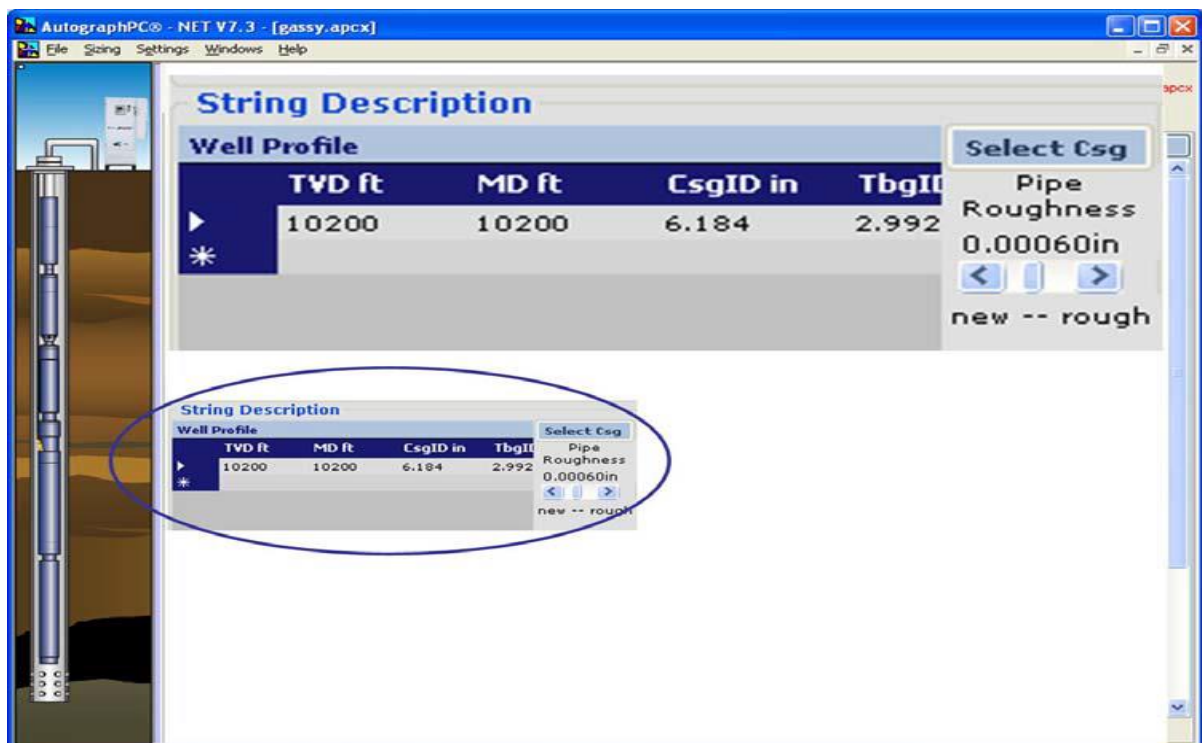


Figura 5.8. Datos transitorios de perforación.
Fuente: BHI – ALS – Autograph PC Student Guide

En la Figura 5.9. Muestra los datos de superficie y de fluido los mismo que el software los dimensiona automáticamente considerando que el programa dimensiona de acuerdo a la presión de la superficie del tubo y la presión de la carcasa.

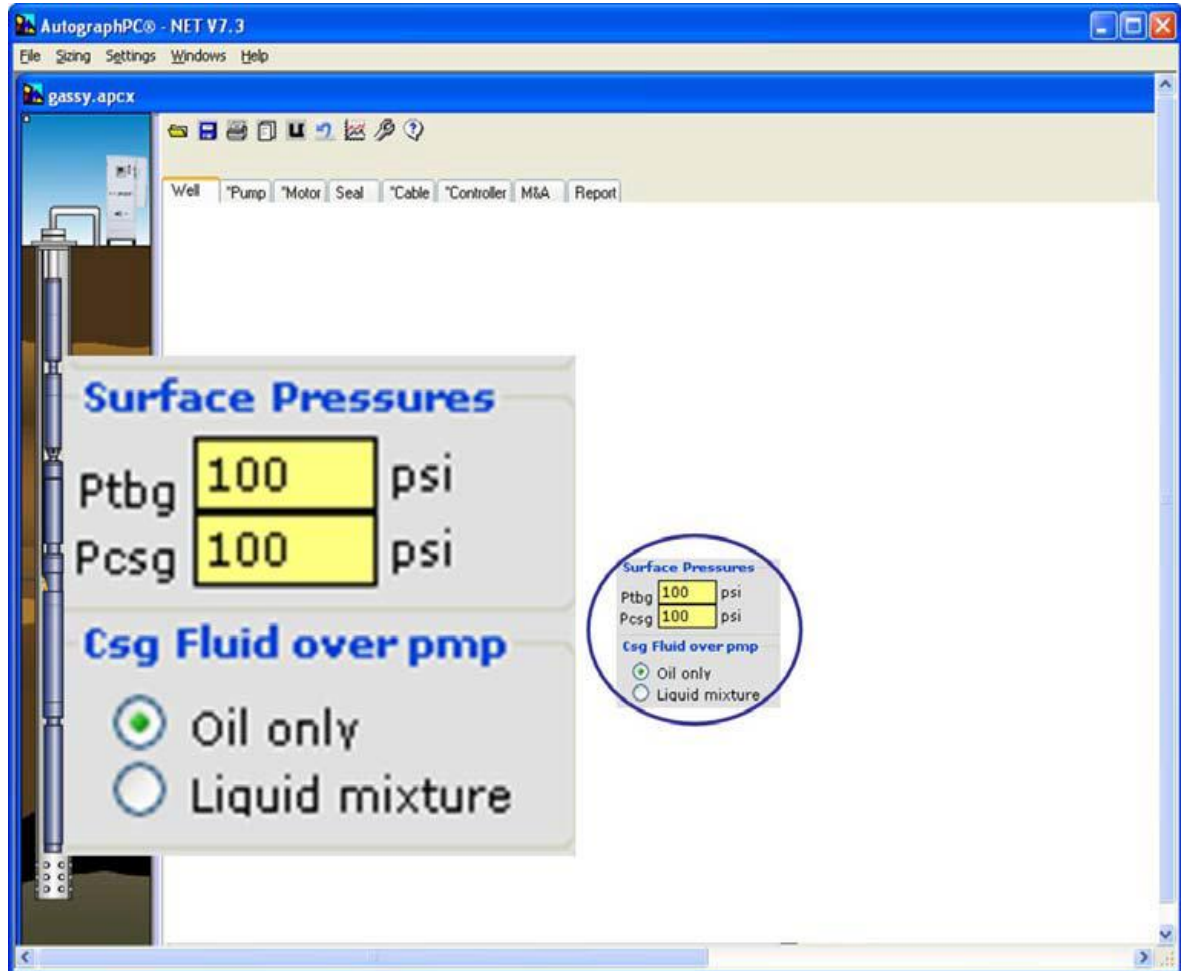


Figura 5.9. Presiones de superficie y del fluido.
Fuente: BHI – ALS – Autograph PC Student Guid

En la Figura 5.10. Muestra la simulación y resultados de las variables obtenidas mediante el software Autograph PC del caso en estudio con los datos previamente analizados del pozo Cuyabeno 68 mediante cálculos matemáticos en el Capítulo 3, en la captura estipula la utilización de valores estrictamente seleccionados en la Tabla 3.1 las mismas que tendrán un aporte directo en la simulación

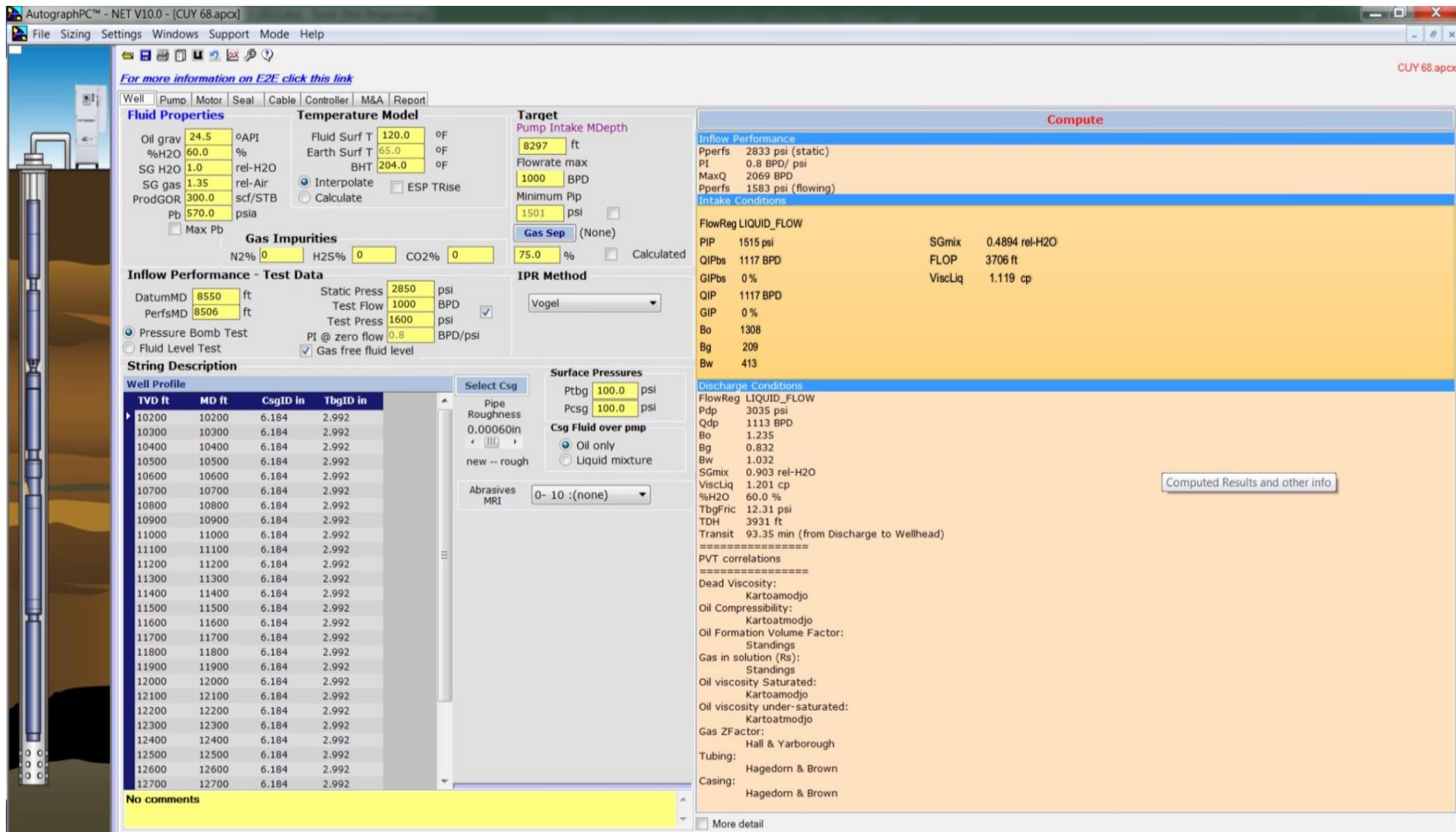


Figura 5.10. Simulación de well del pozo Cuyabeno 68.

Fuente: Alomia, J. 2018

5.2.2. Procedimiento para la selección de bomba.

En la Figura 5.11. Se puede visualizar una captura inicial para el dimensionamiento de la bomba para el sistemas BES con motor jaula de ardilla para el pozo Cuyabeno 68, este procedimiento se da una vez realizado correctamente los datos well . Para un mejor dimensionamiento se describe cada uno de los parámetros de interés para el óptimo dimensionamiento.

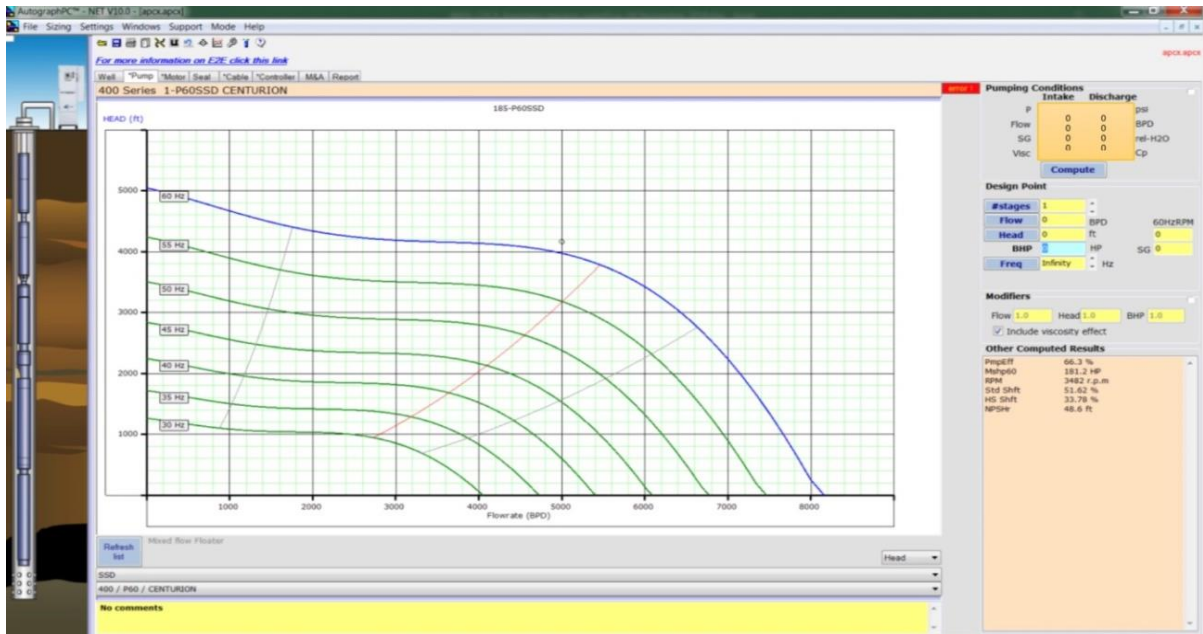


Figura 5.11. Pantalla inicial de dimensionamiento de la bomba.

Fuente: BHI – ALS – Autograph PC Student Guide

La Figura 5.12. Muestra las condiciones a las en que el fluido va a circular estos se enlazan con los resultados obtenidos en el proceso anterior ya realizado en la parte de well del software Autograph PC.

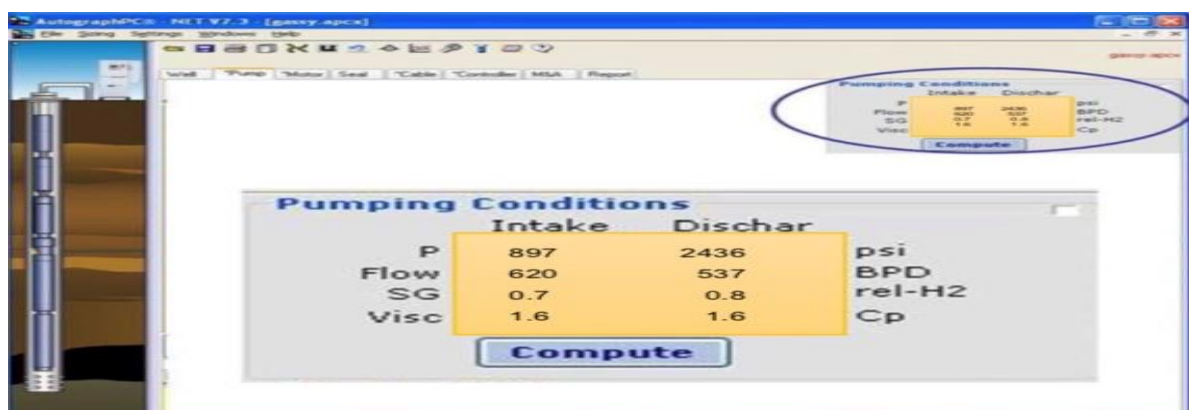


Figura 5.12. Dimensionamiento de la bomba del sistema BES.

Fuente: BHI – ALS – Autograph PC Student Guide

En la Figura 5.13. Muestra los puntos en que se agregan las condiciones de la bomba obtenidas mediante cálculos matemáticos, las condiciones son las siguientes:

- ✓ **# stages:** Numero de etapas
- ✓ **Flow:** Barriles de producción

- ✓ **Freq:** Frecuencia de operación

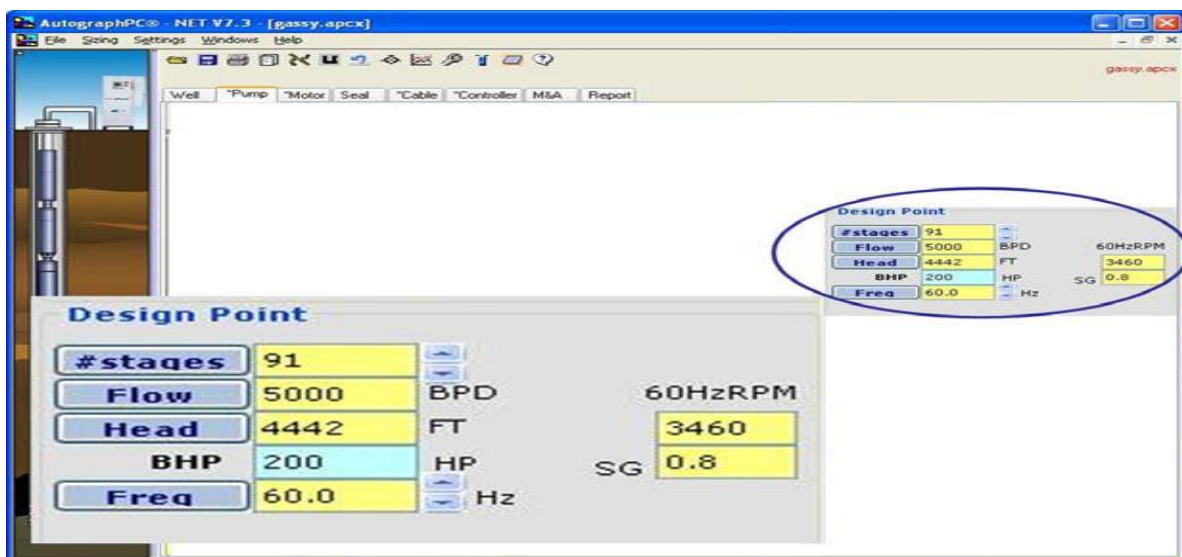


Figura 5.13. Punto de diseño de la bomba del sistema BES.

Fuente: BHI – ALS – Autograph PC Student Guide

La Figura 5.14. Muestra las condiciones operacionales y requerimientos del diseño de la bomba que se realizó anteriormente. Estas condiciones son de suma importancia para determinar la selección del motor del sistema BES considerando que la bomba va enlazada al eje y alimentada de energía directamente del motor.

Las siguientes condiciones ayudaran a seleccionar el motor adecuado para el sistema BES:

- ✓ **RPM:** Revoluciones por minuto
- ✓ **Subcool:** Temperatura de operación

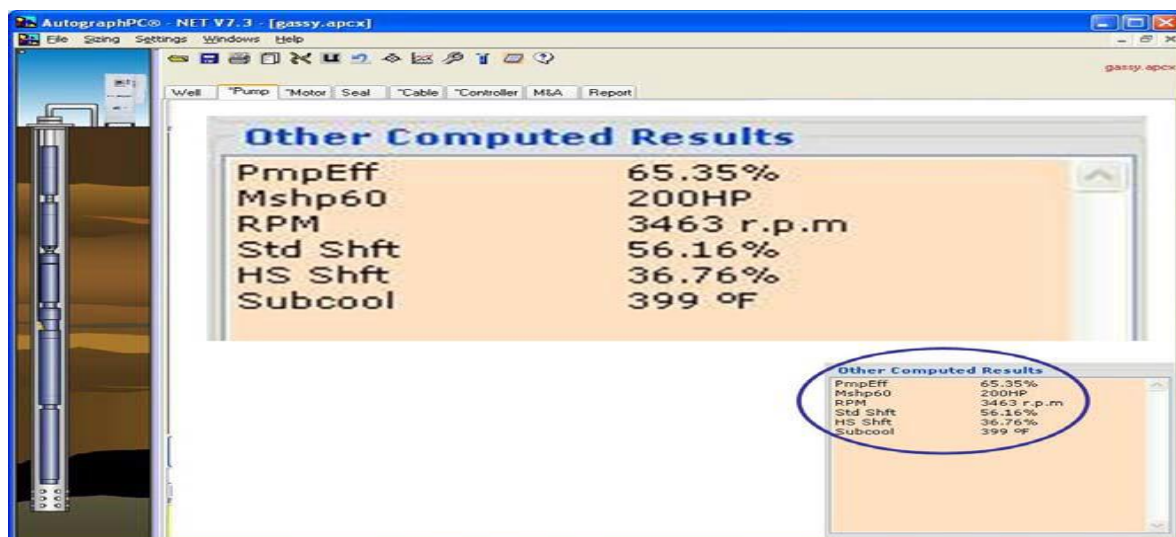


Figura 5.14. Punto de diseño de acuerdo a condiciones del sistema BES.

Fuente: BHI – ALS – Autograph PC Student Guide

La Figura 5.15. Muestra las nomenclaturas de las bombas que existen en el mercado considerando que cada una tiene una utilidad de la siguiente manera:

- ✓ **SHD:** Crudo súper ligero

- ✓ **SND:** Crudo ligero
- ✓ **SSD:** Crudo mediano
- ✓ **SXD:** Crudo pesado

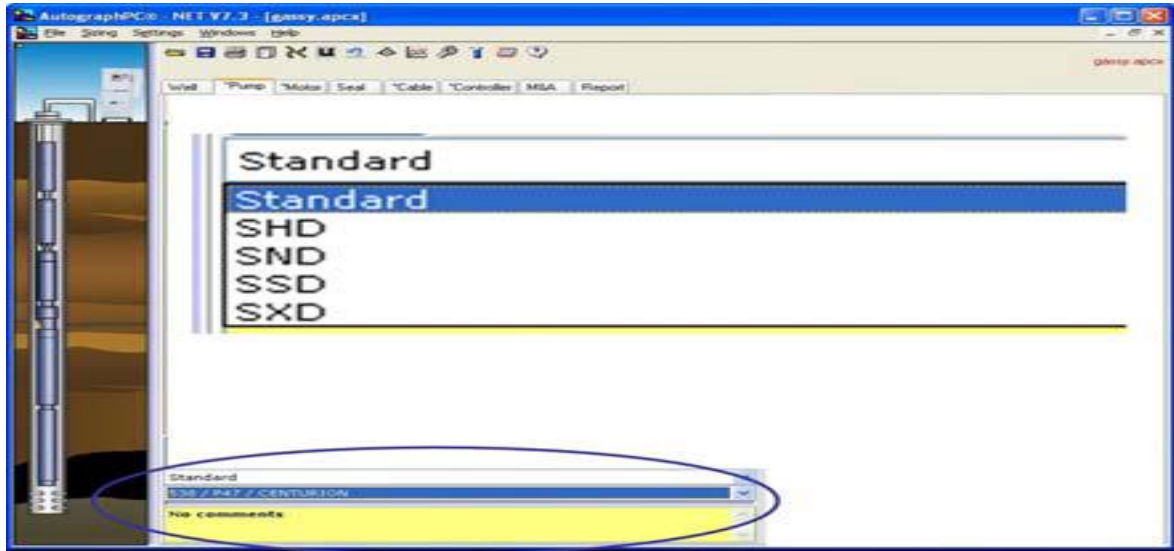


Figura 5.15. Selección de la nomenclatura de la bomba del sistema BES.

Fuente: BHI – ALS – Autograph PC Student Guide

La Figura 5.16. Muestra las nomenclaturas de las bombas que existen en el mercado considerando que cada una tiene una utilidad de la siguiente manera:

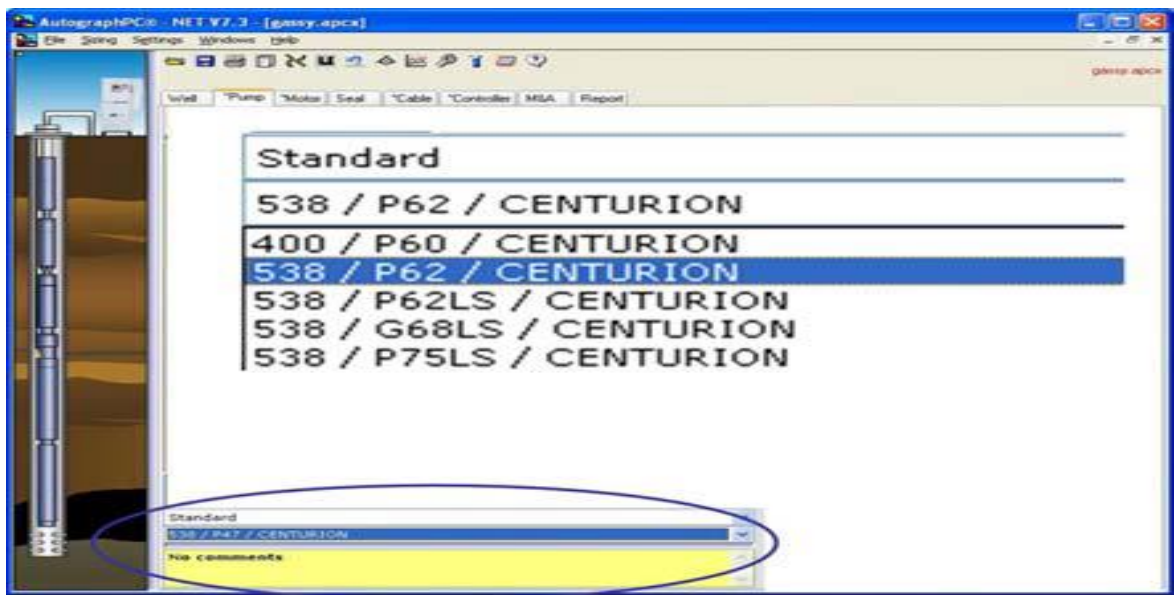


Figura 5.16. Selección de la serie y tipo de la bomba del sistema BES.

Fuente: BHI – ALS – Autograph PC Student Guide

En la Figura 5.17. Muestra el dimensionamiento de la bomba y resultados de las variables obtenidas mediante el software Autograph PC conjuntamente con el cálculo del punto well del pozo Cuyabeno 68, en la captura estipula la utilización de valores obtenidos en la parte de well.



Figura 5.17. Simulación y obtención de la bomba del pozo Cuyabeno 68.

Fuente: Alomia, J. 2018

5.3. Procedimiento para la selección del motor.

En la Figura 5.18. Se puede visualizar una captura inicial de selección del motor para el sistema BES con motor jaula de ardilla para el pozo Cuyabeno 68, este procedimiento se da una vez realizado correctamente los datos well y selección de bomba. Los parámetros operacionales arroja directamente el sistema una vez seleccionado el motor.

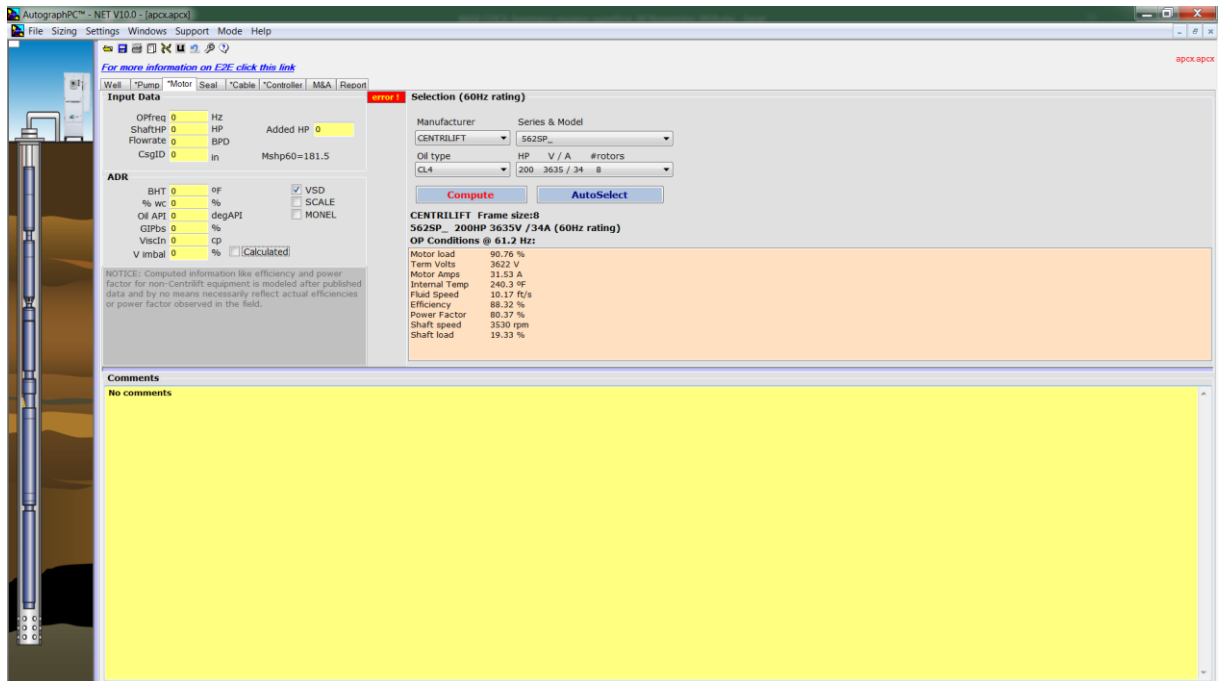


Figura 5.18. Pantalla inicial de dimensionamiento del motor del sistema BES.

Fuente: BHI – ALS – Autograph PC Student Guide

La Figura 5.19. Muestra el input data que es directamente las condiciones de operación del motor las cuales van relacionadas directamente con el cálculo anterior del dimensionamiento de la bomba.

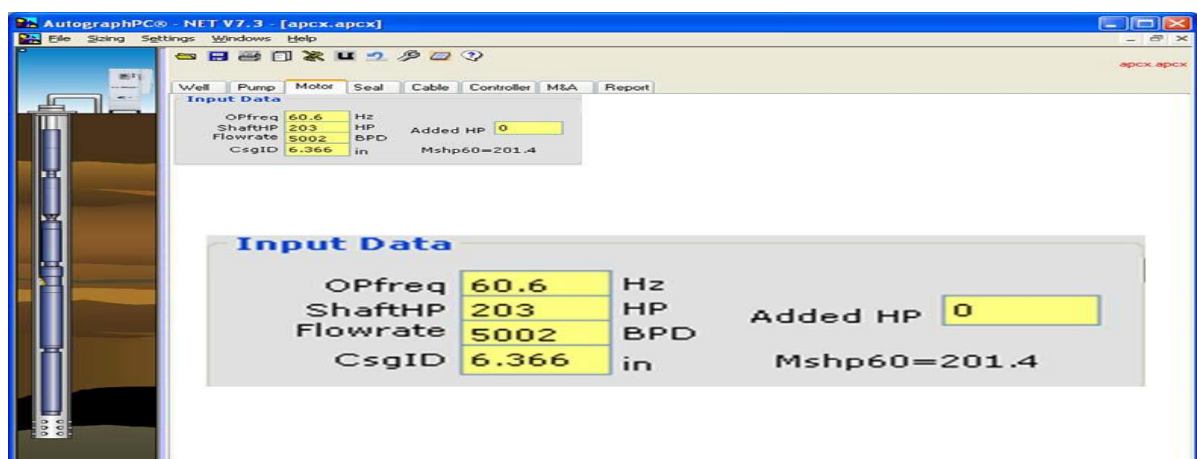


Figura 5.19. Input data del motor del sistema BES.

Fuente: BHI – ALS – Autograph PC Student Guide

La Figura 5.20. Muestra ADR (Clasificaciones dependientes de la aplicación) esta información destaca la información útil de las condiciones del pozo es por ello que esto datos arroja directamente el software una vez realizado cálculos internos en el mismo.

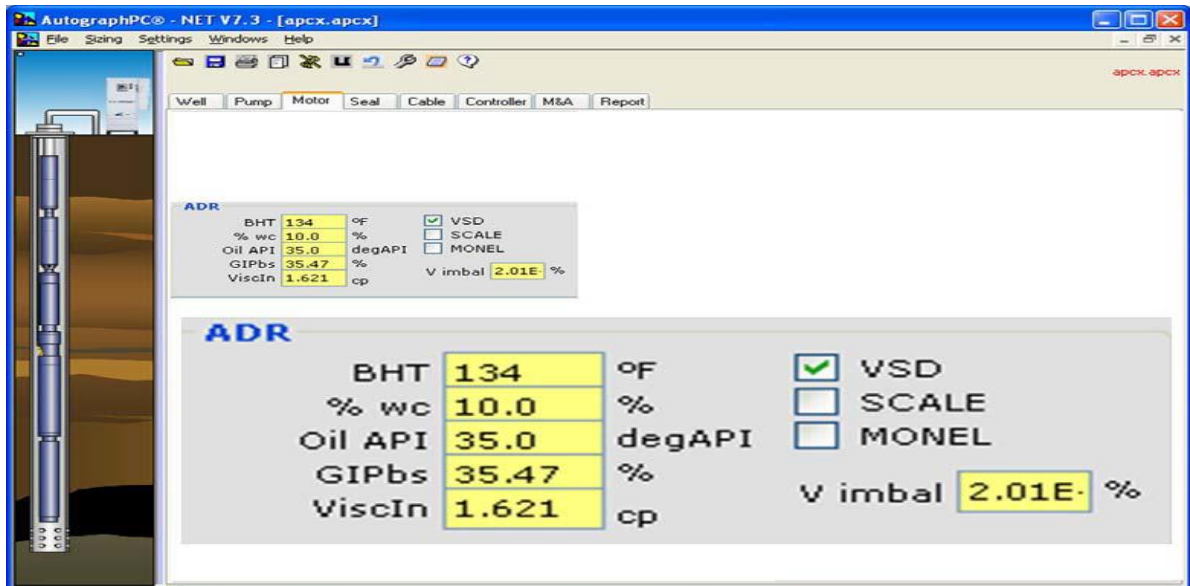


Figura 5.20. ADR del motor del sistema BES.

Fuente: BHI – ALS – Autograph PC Student Guide

La Figura 5.21. Muestra la selección manual del motor es aquí donde ingresa la parte de criterio técnico –práctico lo cual es realmente adquirida en la vida laboral como field engineer (ingeniero de campo). Es aquí el proceso predominante para la viabilidad y fiabilidad del proyecto.

Este procedimiento radica únicamente en satisfacer la necesidad de producción que requiera la empresa

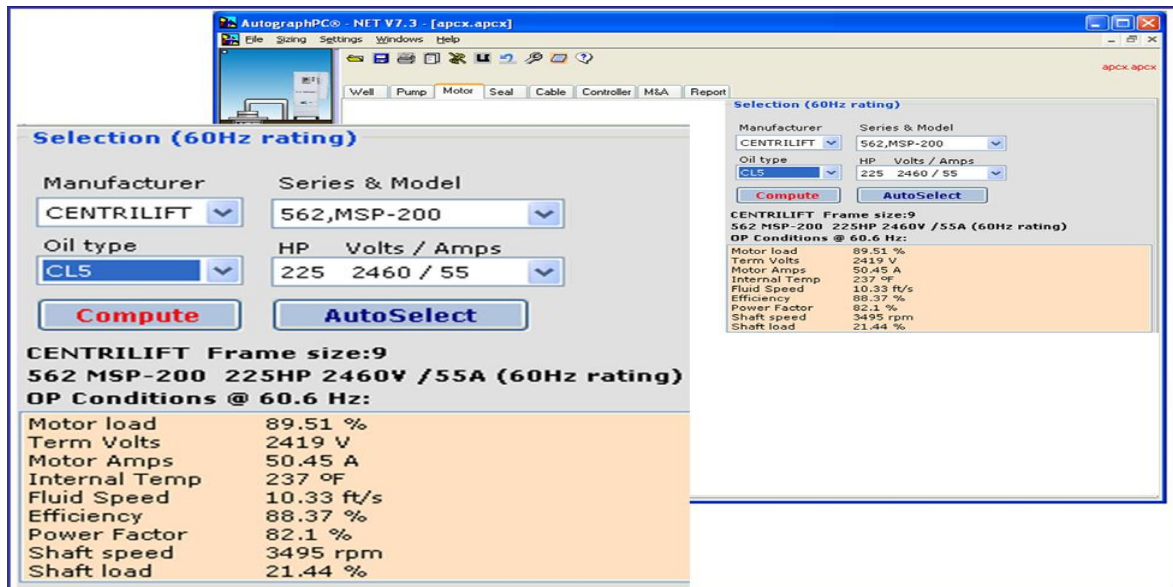


Figura 5.21. Selección del motor del sistema BES.

Fuente: BHI – ALS – Autograph PC Student Guide

En la Figura 5.22. Muestra el dimensionamiento y selección del motor resultados de las variables de operación finalmente podrán ser comparadas con el sistemas de bombeo electromergible con imán permanente y con ello poder definir su eficiencia eléctrica sin dejar de lado un análisis económico que se realizara en el presente propuesta tecnológica.

AutographPC™ - NET V10.0 - [CUY 68.apcx]

File Sizing Settings Windows Support Mode Help

For more information on E2E click this link

Well Pump Motor Seal Cable Controller M&A Report

Input Data

OPfreq 49.7 Hz fspeed
 ShaftHP 65.41 HP Added HP 0
 Flowrate 1000 BPD
 CsgID 6.184 in Mshp60=78.9

ADR

BHT 201.9 °F VSD
 % wc 60.0 % SCALE
 Oil API 24.5 degAPI MONEL
 GIPbs 0 %
 ViscIn 1.119 cp
 V imbal 0.052 % Calculated

NOTICE: Computed information like efficiency and power factor for non-Centrilift equipment is modeled after published data and by no means necessarily reflect actual efficiencies or power factor observed in the field.

Selection (60Hz rating)

Manufacturer Series & Model
 CENTRILIFT 450XP
 Oil type HP V / A #rotors
 CL6 110 2250 / 31 10

Compute **AutoSelect**

CENTRILIFT Frame size:10
450XP 110HP 2250V / 31A (60Hz rating)
OP Conditions @ 49.7 Hz:

Motor load	71.71 %
Term Volts	1729 V
Motor Amps	23.87 A
Internal Temp	270.6 °F
Fluid Speed	0.74 ft/s
Efficiency	84.92 %
Power Factor	82.16 %
Shaft speed	2859 rpm
Shaft load	11.12 %

Comments

No comments

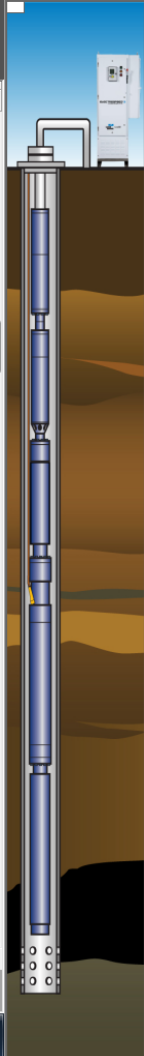


Figura 5.22. Simulación y obtención del motor del pozo Cuyabeno 68.

Fuente: Alomia, J. 2018

5.4. Listado de equipos para cada sistema

En el presente listado se encuentra los elementos del sistema de bombeo electro sumergible (BES) con squared cage engine (SCE) y permanent magnetic motor (PMM) que se delimitaron mediante simulación de software y selección en tablas que se encuentran en los anexos 1, 3, 6 y 8.

Tabla 5.2. Selección de equipos para cada sistema BES

Equipos		
Tipo	BES con SCE	BES con PMM
Bomba	212 STG 450 P12 SSD CENTURION	NB (630-1000)H CMP AR2 CR2C S14
Serie de bomba	450	319
Numero de etapa	212	102
Motor	450FMH 110HP/2250V/31A	PMM N319 6000RPM-105HP-1490V-37.9A

5.5. Listado de operación de los equipos

Los datos estipulados en la presente tabla son los parámetros de operación obtenidos mediante el programa de simulación para el pozo Cuyabeno 68 a continuación en la Tabla 5.3. Se muestra la recopilación de datos de operación.

Tabla 5.3. Parámetros operacionales para cada sistema BES

Equipos		
Tipo	BES con SCE	BES con PMM
Numero de etapa	212	102
Voltaje del motor	1729	1440
Corriente	23.87	37.9
Velocidad del motor	2859	5334
Temperatura del motor	270.6	360
Eficiencia	84.9	88.5

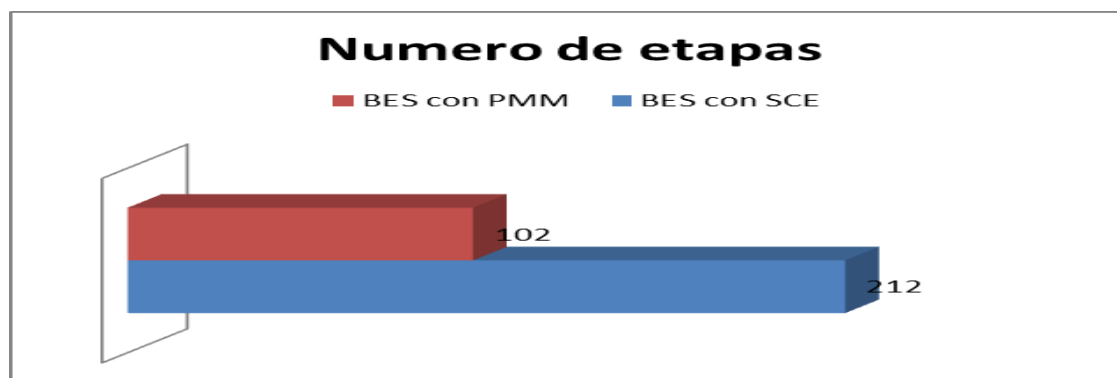


Figura 5.23. Comparativa del número de etapas de los sistemas BES

Fuente: Alomia. J. 2018

La Figura 5.23. Estipula claramente una vez realizado el posterior diseño del sistema BES se obtiene el resultado de 102 etapas para el sistema con PMM y 212 etapas para el sistema SCE. La cantidad del número de etapas influye directamente en el tamaño del equipo es por ello que en este caso el sistema BES con PMM sería extremadamente pequeño a comparación del sistema BES con SCE.

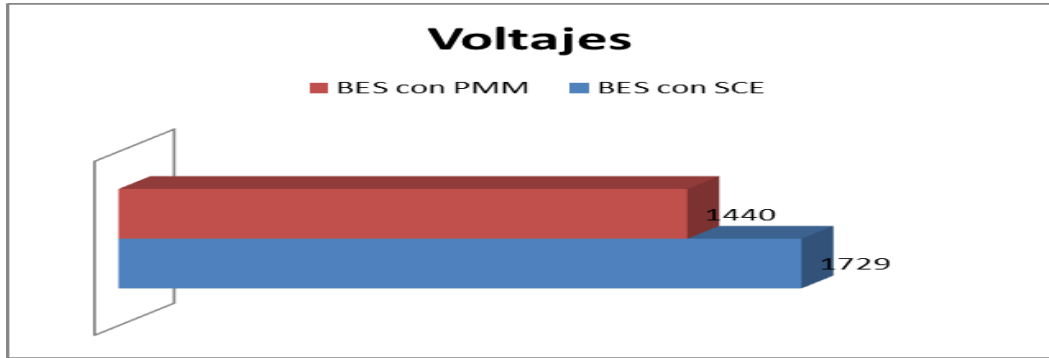


Figura 5.24. Comparativa de los voltajes de operación de los sistemas BES
Fuente: Alomia. J. 2018

La Figura 5.24. Muestra una mayor necesidad de voltaje de operación en el sistema BES con PMM que es de 1440 V a comparación del otro sistema BES con SCE que requiere 1729 V.

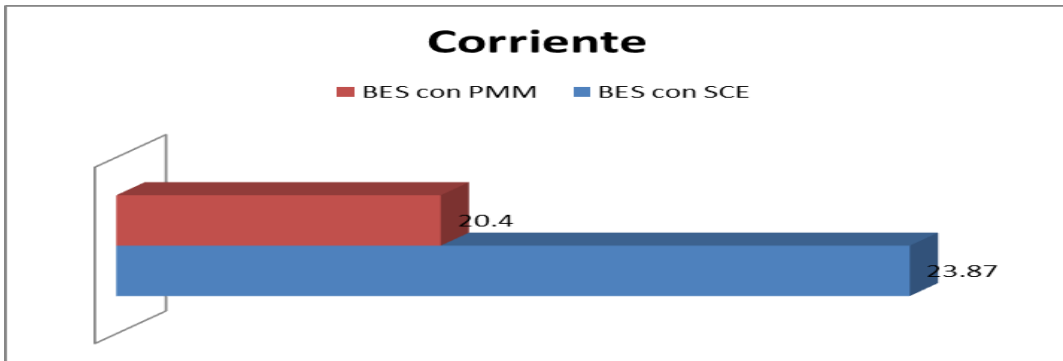


Figura 5.25. Corriente de los motores
Fuente: Alomia. J. 2018

La Figura 5.25. Muestra una mayor necesidad de corriente de operación en el sistema BES con SCE que es de 23.87 A, a comparación del otro sistema BES con PMM que requiere 20.4 V.

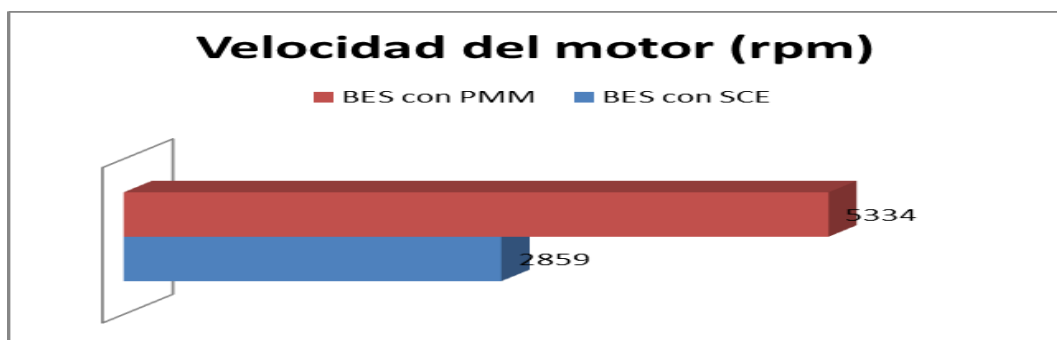


Figura 5.26. Revoluciones por minuto de los motores
Fuente: Alomia. J. 2018

La Figura 5.26. Muestra una mayor velocidad de operación en el sistema BES con PMM que es de 5334 RPM, a comparación del otro sistema BES con SCE que requiere 2859 RPM. Esto influye radicalmente en una mejor maniobrabilidad en superficie del motor.

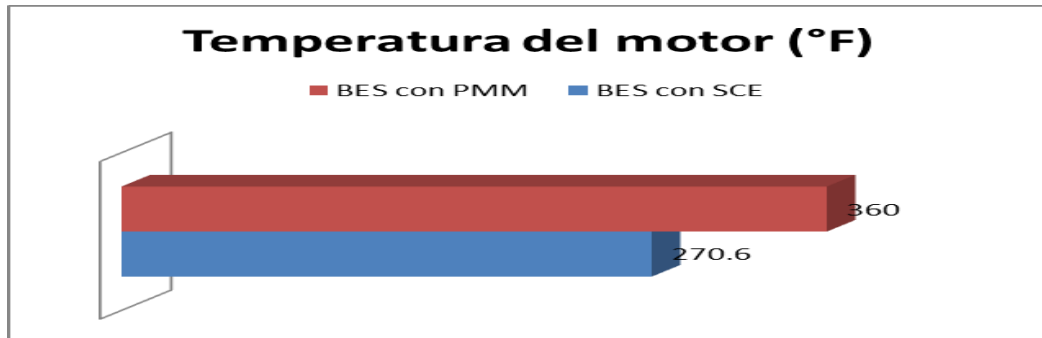


Figura 5.27. Temperatura de los motores

Fuente: Alomia. J. 2018

La Figura 5.27. Muestra una mayor temperatura de operación en el sistema BES con PMM que es de 360°F, a comparación del otro sistema BES con SCE que 270°F. Esto influye radicalmente en un mejor desempeño del motor a altas profundidades.

5.6. Costo anual del consumo de energía

El cálculo del consumo de energía se realiza mediante la aplicación de la fórmula del inciso 4.2.19 en la cual se estipula parámetro de cálculos mediante dos procedimientos matemáticos en los mismos que se debe considerar el MTTR y el TF.

Tabla 5.4. Consumo energético para cada sistema BES

Costo de consumo de Energía	
BES con SCE (USD/año)	BES con PMM (USD/año)
\$51.594	\$14.301

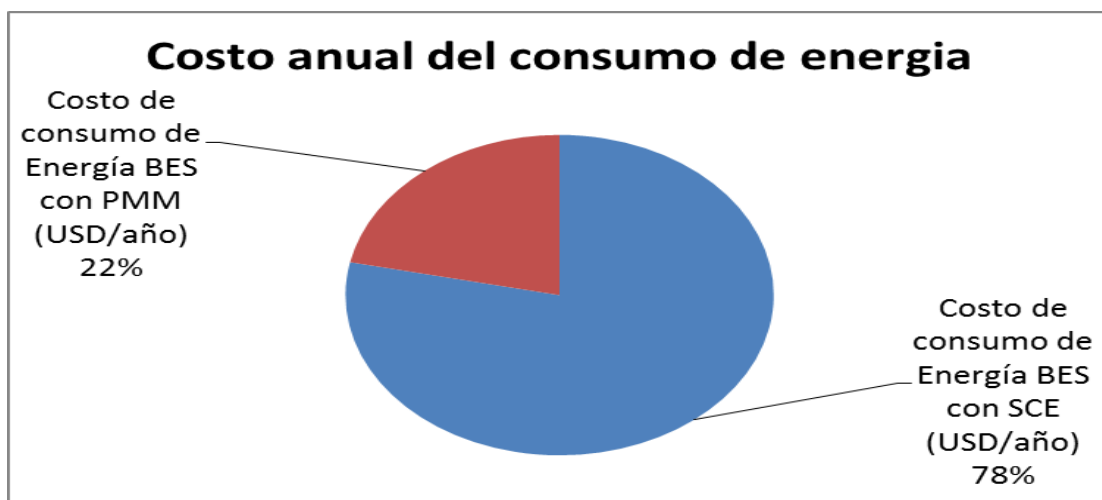


Figura 5.28. Comparativa del consumo de energía de los sistemas BES

Fuente: Alomia. J. 2018

La figura 5.28 muestra de manera porcentual un mayor consumo en aspecto económico de energía en el sistema con motor jaula de ardilla a comparación del sistema con motor de imán permanente que es mucho menor considerando que es sistema con motor jaula de ardilla requiere un tasa de falla estimada de 2 al año y esto incide principalmente en paros de consumo de energía incluso con eso, su consumo es mucho mayor.

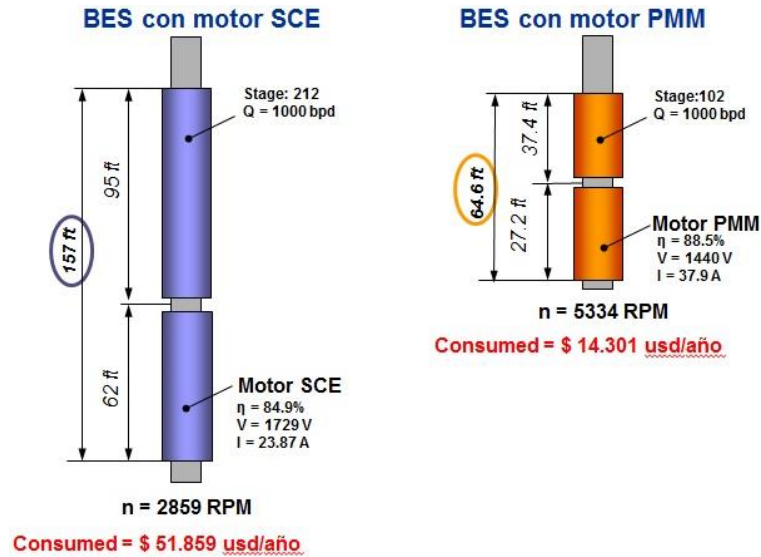


Figura 5.29. Características operacionales de los sistemas

Fuente: Alomia. J. 2018

La figura 5.29 muestra de manera resumida todas las características operacionales y económicas de los sistemas de bombeo electrosumergible para cada motor, estos datos son obtenidos mediante los cálculos matemáticos y simulación previamente realizada.

5.7. Análisis Económico

El análisis económico del presente estudio comparativo tiene como principal objetivo delimitar la viabilidad y rentabilidad económica para la implementación de cualquiera de las dos tecnologías en el pozo Cuyabeno 68

Hay que considerar que para llegar al objetivo deseado se sintetizará y parametrizar los siguientes factores que son explicados detalladamente a continuación los mismos que aportarán sustancialmente para validar la rentabilidad económica y viabilidad del presente análisis.

5.7.1. Ingresos

Son aquellos que se obtienen al elaborar una multiplicación entre el precio del barril de petróleo con el número de barriles producidos mensualmente. Para calcular la producción mensual se implementará la siguiente expresión matemática de la declinación exponencial.

$$q = q_1 * e^{-Dt} \quad (5.1)$$

Dónde:

q = Caudal esperado (STB)

q_1 = Caudal inicial (STB)

D = Declinación de campo 8% anual y 0.66% mensual

t = Tiempo estimado para el nuevo caudal

5.7.2. Egresos

Es el resultado de sumar los costos de reparación del pozo y el costo operativo de producción que se encuentra estimadamente a 7 USD/BL. Los costos de reparación se descartan ya que se realiza un periodo de evaluación que se contempla por de 12 meses.

5.7.3. Valor Actual Neto (VAN)

Es el parámetro comparativo para determinar la viabilidad del proyecto para ello se considerarán los datos que se encuentran en la siguiente Tabla 5.5.

Tabla 5.5. Características de VAN

VAN		
Valor	Detalle	Decisión
VAN>0	Ganancias	Aceptable
VAN<0	Perdidas	No aceptable
VAN=0	Ni ganancias, ni perdidas	Buscar otra generación de ganancia

Los datos estipulados en la tabla 5.5 se obtienen aplicando la siguiente formula:

$$VAN = \sum_{k=0}^n \frac{FCN_k}{(1+i)^t} \quad (5.2)$$

Dónde:

FCN_k = Flujo de caja

k = Periodo de evaluación

i = Tasa de interés

5.7.4. Tasa Interna de Retorno (TIR)

Mediante este procedimiento podemos delimitar la aceptabilidad o el rechazo del proyecto en sí, considerando que a mayor TIR mayor es la rentabilidad del mismo en la siguiente tabla se establece los valores de aceptabilidad del proyecto.

Tabla 5.6. Características de TIR

Valor	Detalle	Decisión
TIR>i	Rentable	Aceptable
TIR<i	No rentable	No aceptable

Los datos estipulados en la tabla 5.6 se obtienen aplicando la siguiente formula:

$$VAN = \sum_{k=0}^n \frac{FCN_k}{(1+TIR)^t} - I_0 \quad (5.3)$$

Dónde:

I_0 = Capital para iniciar el proyecto

FCN_k = Flujo de caja

k = Periodo de evaluación

5.7.5. Relación Costo – Beneficio (RCB)

Este parámetro va directamente relacionado con los ingresos, gastos y la inversión del proyecto los cuales aportan sustancialmente para validar la conveniencia del proyecto. El RCB se obtiene implementando la siguiente expresión:

$$RCB = \frac{\text{Ingresos actuales}}{\text{Costos actualizados+Inversion Generada}} \quad (5.4)$$

Dónde:

RCB = Relación costo – beneficio

Inversion generada = inversión de apertura de proyecto

Costos actualizados = Costo con tasa actualizada

Se dará la aceptación del proyecto de acuerdo a las características que se detallan en la siguiente tabla:

Tabla 5.7. Características de RCB

Valor	Detalle	Decisión
RCB>1	Ingresos mayores a los egresos	Aceptable
RCB<1	Ingresos y egresos son iguales	Indiferente
RCB=1	Egresos mayores que ingresos	Rechazado

5.7.6. Evaluación Económica

En la evaluación económica se deberán considerar los siguientes parámetros para sí poder llevar a cabo el presente análisis económico:

- La estatal petrolera Petroamazonas EP, antepone una tasa anual de actualización del 12% por ende su actualización mensual es del 1%
- En la evaluación económica no se consideran impuestos fiscales es por ello que la depreciación contable de los equipos no interviene.

- Se considera un costo operativo de \$ 7 USD/BL
- Se establece un costo de barril de crudo a \$ 55 dólares.

En la siguiente tabla se detalla los cálculos obtenidos del análisis económico del estudio comparativo de las dos tecnologías y con ello delimitamos la viabilidad del proyecto.

La Grafica 5.30. Detalla el tiempo de recuperación de la inversión de cada uno de los sistemas de bombeo electrosumergible.

Los indicadores económicos determinan que cualquiera de las dos tecnologías es viable. Pero el porcentaje elevado del TIR y tiempo de recuperación de la inversión obtenido mediante los cálculos nos da que la mayor viabilidad es el uso del motor de imán permanente en el sistema de levantamiento artificial por bombeo electrosumergible en el pozo Cuyabeno 6

Tabla 5.8. Análisis económico para el sistema BES con SCE

MOTOR SCE									
MES	PRODUCCION DIARIA CON SCE (BPPD)	PRODUCCION MENSUAL CON SCE (BPPM)	INGRESOS (USD)	COSTO DE INSTALACION (USD)	COSTO OPERATIVO (USD/BL)	EGRESO TOTAL (USD)	FLUJO DE CAJA NETO (USD)	INGRESOS ACTUALIZADOS (USD)	INGRESOS ACTUALIZADOS ACUMULADOS (USD)
1	-	-	-	1111600	-	1111600	-1111600	-	-1111600
2	153	4590	252450	-	32130	32130	220320	247860	247860
3	160	4800	264000	-	33600	33600	230400	259200	507060
4	303	9090	499950	-	63630	63630	436320	490860	997920
5	327	9810	539550	-	68670	68670	470880	529740	1527660
6	293	8790	483450	-	61530	61530	421920	474660	2002320
7	402	12060	663300	-	84420	84420	578880	651240	2653560
8	230	6900	379500	-	48300	48300	331200	372600	3026160
9	200	6000	330000	-	42000	42000	288000	324000	3350160
10	130	3900	214500	-	27300	27300	187200	210600	3560760
11	40	1200	66000	-	8400	8400	57600	64800	3625560
12	45	1350	74250	-	9450	9450	64800	72900	3698460
		68490	3766950	1111600	479430	1591030	2175920	3698460	

Tabla 5.9. Análisis económico para el sistema BES con PMM

MOTOR PMM									
MESES	PRODUCCION DIARIA CON PMM (BPPD)	PRODUCCION MENSUAL CON PMM (BPPM)	INGRESOS (USD)	COSTO DE INSTALACION (USD)	COSTO OPERATIVO (USD/BL)	EGRESO TOTAL (USD)	FLUJO DE CAJA NETO (USD)	INGRESOS ACTUALIZADOS (USD)	INGRESOS ACTUALIZADOS ACUMULADOS (USD)
1	-	-	-	1272400	-	1272400	-1272400	-	-1272400
2	446	13380	735900	-	93660	93660	642240	722520	722520
3	376	11280	620400	-	78960	78960	541440	609120	1331640
4	277	8310	457050	-	58170	58170	398880	448740	1780380
5	280	8400	462000	-	58800	58800	403200	453600	2233980
6	300	9000	495000	-	63000	63000	432000	486000	2719980
7	160	4800	264000	-	33600	33600	230400	259200	2979180
8	100	3000	165000	-	21000	21000	144000	162000	3141180
9	306	9180	504900	-	64260	64260	440640	495720	3636900
10	111	3330	183150	-	23310	23310	159840	179820	3816720
11	88	2640	145200	-	18480	18480	126720	142560	3959280
12	91	2730	150150	-	19110	19110	131040	147420	4106700
		76050	4182750	1272400	2281500	1804750	2378000	4106700	

	BES CON SCE	BES CON PMM
VAN	\$ 5,851,754.59	\$ 8,107,263.16
TIR	71%	98%
RCB	3.3	3.2

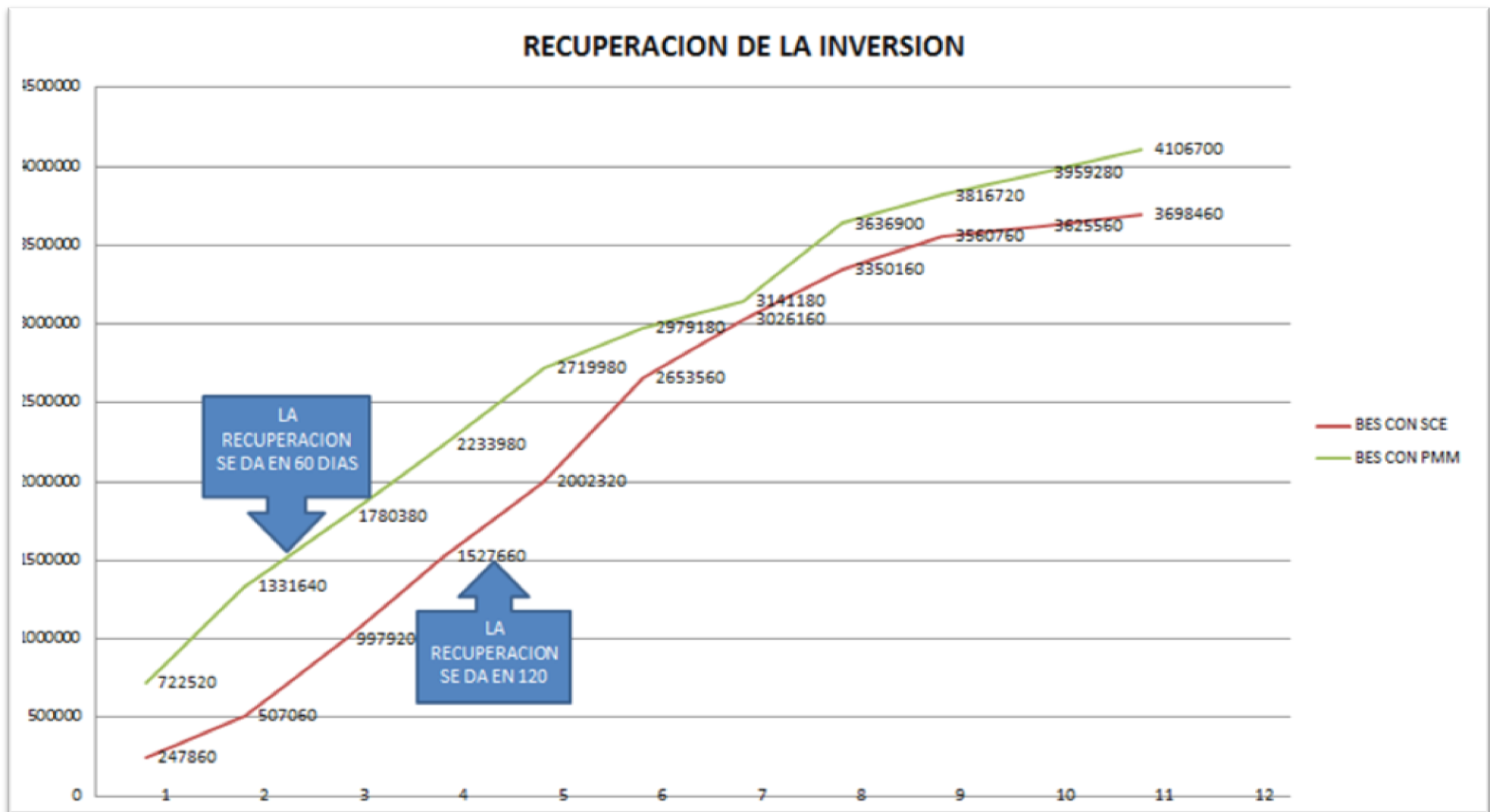


Figura 5.30. Tiempo de recuperación de la inversión de los sistemas BES
Fuente: Alomia, J. 2018

5.7.7. Costo de producción

Los costos de producción de cada sistema son obtenidos de los Anexos 11 y Anexo 12 en los cuales se estipula los valores hacer contratados de acuerdo a los servicios que proporciona cada empresa mediante un análisis económico por parte de la Secretaria de Hidrocarburos del Ecuador SHE.

Tabla 5.10. Costos de producción para cada sistema BES

COSTOS DE LOS DIFERENTES SISTEMAS BES		
TRABAJO	COSTO (USD)	COSTO (USD)
	SCE	PMM
Movimiento de la torre	\$ 12,000.00	\$ 12,000.00
Trabajo de la torre (7 días)	\$ 84,000.00	\$ 84,000.00
Supervisión y transporte	\$ 30,000.00	\$ 30,000.00
Equipo de superficie y fondo	\$ 800,000.00	\$ 950,000.00
Supervisión e instalación de BES	\$ 15,000.00	\$ 14,000.00
Spooler	\$ 35,000.00	\$ 34,000.00
Wireline	\$ 25,000.00	\$ 24,000.00
Disparos con cable	\$ 15,000.00	\$ 14,000.00
Contingencias	\$ 95,600.00	\$ 110,400.00
TOTAL	\$ 1,111,600.00	\$ 1,272,400.00

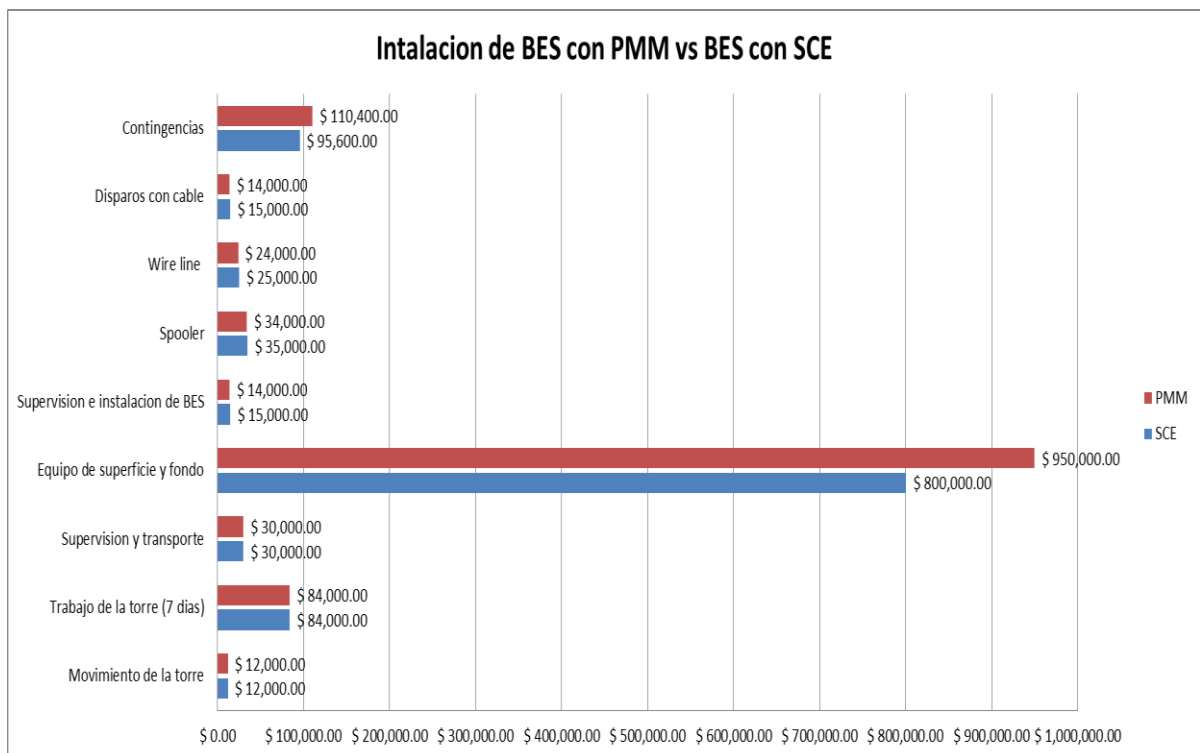


Figura 5.31. Comparativa de costos de los sistemas BES

Fuente: Alomia. J. 2018

6. PRESUPUESTO

Tabla 6.1. Presupuesto de la propuesta tecnologica

Rubro	Valor
Materiales y suministros	
Material bibliográfico (libros, internet)	200
Impresiones (libros, borradores)	120
Copias (libros)	80
TOTAL	400
Transporte y salidas de campo	
Latacunga - Quito (4 viajes)	60
Latacunga - Coca (2 viajes)	40
TOTAL	100
Gastos Varios	
Alimentación (2 veces al día)	36
Hospedaje (4 días - Coca)	80
TOTAL	116
Inversión Total	616

6.1. Análisis de impactos

6.1.1. Impacto económico:

El uso del motor de imán permanente en los sistemas de levantamiento artificial por bombeo electrosumergible cuestiona la recuperación rápida a de la inversión económica inicial que sería de 1'272.400.00 dólares los mismos que se recuperaría en 60 días generando una utilidad de 6'834.863.00 dólares a comparación de los 120 días que necesita el motor jaula de ardilla para recuperar 1'111.600.00 dólares y generar una utilidad de 4'740.154.00 dólares; es por ello que estos sistemas se basan únicamente en la generación de ingresos económicos rentables para la empresa que adquiera este tipo de tecnología considerando que la inversión inicial es más elevada a comparación del sistemas de bombeo electrosumergible con motor jaula de ardilla. Es por ello que un análisis económico es sustancial en la toma de decisiones al implementar cualquiera de los dos motores.

6.1.2. Impacto tecnológico

El estudio realizado determina que el motor de imán permanente en los sistemas de bombeo electrosumergible dejaría a un lado al motor jaula de ardilla ya que sus características operacionales superan radicalmente en todas sus propiedades como temperatura, velocidad, costos de operación y consumo de energía. Estas características le hacen un sistema óptimo para ser implementado en el pozo Cuyabeno 68.

7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

7.1. Conclusiones

- La retroalimentación acerca de todo lo que encierra el sistema de bombeo electrosumergible y por ende las características de los motores que componen el sistema permitió parametrizar principios eléctricos (voltaje, corriente, consumo de energía, velocidad, etc) y características del fluido (presión estática, corte de agua, punto de burbuja, profundidades, etc) los mismos que serán enfocados a un análisis de eficiencia eléctrica del sistema.
- El resultado obtenido mediante los cálculos matemáticos y la ayuda del software nos da como resultados que para un sistema de bombeo electrosumergible con motor de imán permanente tiene 102 etapas a comparación de sistema con motor de inducción tipo jaula de ardilla de 212 etapas esto influye sustancialmente en el tamaño del equipo ya que a mayor número de etapas su tamaño es mucho mayor y complica su desplazamiento en fondo.
- El sistema bombeo electrosumergible con motor de imán permanente cumple con una eficiencia del 88.5% a comparación del 84.9% del sistema de bombeo electrosumergible con motor jaula de ardilla ya que mediante las comparaciones realizadas como su voltaje y corriente en parámetros operacionales consumen menos que el otro sistema considerando que el motor de imán permanente posee la cualidad de trabajar en ambientes bruscos por ende soporta una temperatura de hasta 360°F con las condiciones mencionadas anteriormente se concluye que el motor en mención cumple una eficiencia eléctrica eficaz en el sistema.
- La rentabilidad económica que mediante un análisis nos da como resultado que la inversión inicial del sistema bes con motor de imán permanente se recupera en 60 días a comparación de los 120 días que requiere el sistema bes con motor jaula de ardilla considerando que los dos son económicamente rentables pero la TIR del sistema bes con motor pmm es más elevada.

7.2. Recomendaciones

- Considerar la implementación del motor de imán permanente en los sistemas de levantamiento artificial de los pozos petroleros que actualmente se encuentran operando con motor de inducción tipo jaula de ardilla ya que este estudio demostró la viabilidad tanto técnica como económica que este tipo de motor brinda al sistema de bombeo electrosumergible.
- Se recomienda el presente trabajo investigativo como una guía en futuras investigaciones relacionadas con el sector petrolero en especial con la línea de levantamiento artificial ya que la misma es la más importante de esta industria.

- Después de culminada la investigación se recomienda el motor de imán permanente ya que su consumo de energía anual representa solo un 22% (\$ 14.301) a comparación del 78% (\$ 51.589) de consumo que requiere el sistema de bombeo electro sumergible con motor de inducción tipo jaula de ardilla.
- Es ambientalmente recomendable el motor de imán permanente en el sistema de bombeo electrosumergible para el pozo Cuyabeno 68 el mismo que posee sistema de generación diesel en superficie el cual extrae un fluido trifásico (gas, agua y petróleo) y las emisiones de CO₂ del sistema de bombeo electrosumergible con motor de imán permanente son relativamente bajas ($360 T de \frac{CO_2}{año}$) a comparación del sistema de bombeo electrosumergible con motor jaula de ardilla que tiene emisiones de ($137 T de \frac{CO_2}{año}$). Los cálculos respectivos se encuentran en el Anexo 15.

8. NOMENCLATURA

BES = Bomba electrosumergible

BHPbomba = Potencia requerida de la bomba

fem = Fuerza electromotriz

WC = Corte de agua

P_{IP} = Presión de entrada de la bomba

μ₀ = Viscosidad dinámica del petróleo

P_r = Presión estática de fondo

P_{wf} = Presión de fondo fluyente

Q_d = Caudal deseado de producción

IP = Índice de productividad

P_{wh} = Presión en la cabeza del pozo

GOR = Relación gas-petróleo

BHT = Temperatura del fondo del pozo

Y_w = Gravedad específica del agua

Y_o = Gravedad específica del petróleo

Y_g = Gravedad específica del gas

THD = Cabeza dinámica total

SG_L = Gravedad específica del líquido compuesto

R_s = Gas en solución con el petróleo

GOR_{pump} = Relación gas – petróleo a la entrada de la bomba

B_w = Factor volumétrico del agua

B_o = Factor volumétrico del petróleo

B_g = Factor volumétrico del gas

V_w = Volumen de agua

V_o = Volumen de petróleo

V_g = Volumen de gas

V_t = Volumen total

V_{gn} = Volumen real de gas ingerido por la bomba

V_{tn} = Volumen total de gas ingerido por la bomba

GOR_{tb} = Relación gas – petróleo en el tubing

SG_{mix} = Gravedad específica compuesta de fluidos

$TMPF$ = Masa total de fluidos producidos

H_d = Altura neta vertical

F_t = pérdidas por fricción

P_d = Presión de descarga de la tubería de producción

9. REFERENCIAS

- [1] B. Hughes, Artificial Lift Progressing Cavity Pumping, Quito: BHI, 2015.
- [2] B. Hughes, A procedure for ESPCP System Selection, Quito: BHI, 2013.
- [3] B. Hughes, Centrilift Submersible Pump Handbook, Clearmore Oklahoma: Stuart Roosa, 2017.
- [4] B. Hughes, Course Artificial Lift Systems, Clearmore - Oklahoma: BHI, 2016.
- [5] B. Hughes, PCP Training - Theory and Overview, Quito: BHI, 2014.
- [6] Schlumberger, Principios de Bombeo Electrosumergible - Plan de Entrenamiento, Quito: SLB, 2016.
- [7] S. Escalante, Bombeo Electrosumergible, Venezuela, 2015.
- [8] E. OIL, Bombeo Electrosumergible, Venezuela: Monogas, 2004.
- [9] Schlumberger, Reda Production System, Houston: SLB, 2015.
- [10] B. Hughes, Operators Manual Electro Speed Variable Speed Drive, Quito: BHI, 2012.
- [11] S. Surencó, REDA Maximus, Houston Texas, 2006.
- [12] Novomet, Product Catalog, Russia: Perm, 2014.
- [13] Novomet, Novomet Solutions Arsenal, Russia: Perm, 2013.
- [14] W. International, Electric Submersible Pumping Systems, Houston Texas, 2007.
- [15] B. Hughes, Sistemas de Electrobombas Sumergibles de Cavidad Progresiva para Bombeo Artificial, Quito: BHI, 2013.
- [16] B. Hughes, ESPCP Training - Application Sizing, Quito, 2015.

ANEXOS

ESP CATALOG

MULTIPHASE PUMP

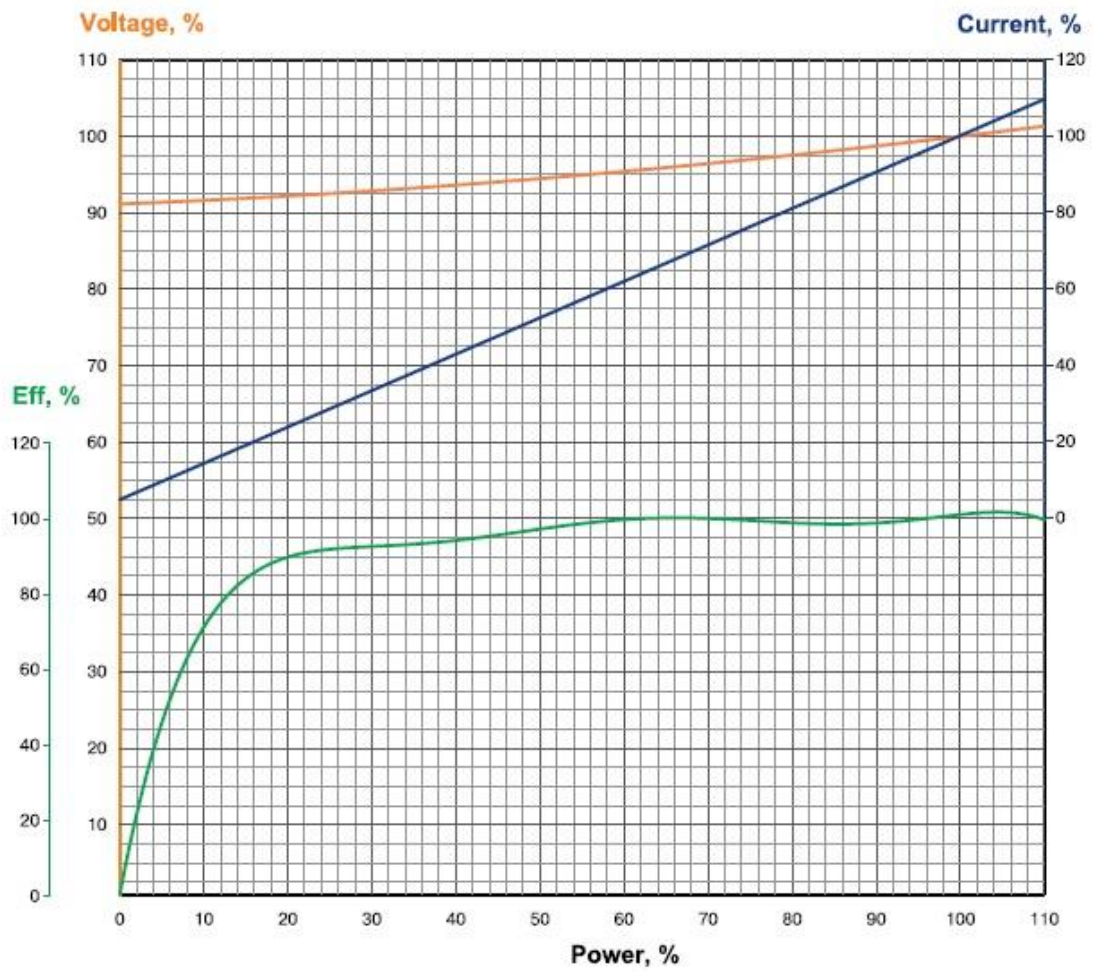
MULTIPHASE PUMP SPECIFICATION

Nomenclature	Installed length		Weight		Housing diameter		Shaft diameter		Nominal flow rate of single phase fluid		Part Number
	ft	m	lb	kg	in	mm	in	mm	bpd @ 60 Hz	m ³ /day @ 50 Hz	
N272MPP940 CMP AR2 CR1 S14 24STG	6.6	2.0	132.30	60	2.72	69	0.50	12.8	940	125	3001950001
N319MPP940 CMP AR2 CR1 S14 15STG	6.6	2.0	198.45	90	3.19	81	0.67	17	940	125	3001900002
N362MPP1500 CMP AR2 CR1 S14 22STG	8.2	2.5	198.45	90	3.62	92	0.79	20	1500	200	3001580029
N406MPP940 CMP AR2 CR1 S14 13STG	6.6	2.0	242.55	110	4.06	103	0.87	22	940	125	3001660010
N406MPP2400 CMP AR2 CR1 S14 20STG	9.8	3.0	286.65	130	4.06	103	0.87	22	2400	320	3001670022
N406MPP3800 CMP AR2 CR1 S14 28STG	13.1	4.0	374.85	170	4.06	103	0.87	22	3800	500	3001210052
N535MPP12000 CMP AR2 CR3 S14 11STG	7.4	2.3	322.00	105	5.35	136	1.18	30	12000	1600	3001940002

Characteristics of 319 series ESP

Pump OD	3.19 in	81 mm
Motor OD	3.19 in	81 mm
Maximum OD of ESP system	3.74 in	95 mm
Minimum casing OD	4.49 in	114 mm
Minimum casing ID	3.92 in	99.6 mm

Stage	Flow rate		Frequency range, rpm	Efficiency, %
	bpd	m ³ /day		
NBV(250-500)H	189-679	30-108	2850-5820	52
NB(630-1000)H	377-1258	60-200	2590-5820	63
NB(1100-1800)H	503-2264	80-360	2910-5820	64



DESIGN DATA ON PERMANENT MAGNET 319 SERIES (OD 81 MM)

Description	Motor hp		kW		Volts		Amps	Min.fluid velocity, ft/s	Min.fluid velocity, m/s	Type	Lenght		Weight		Part Number
	200Hz	150Hz	200Hz	150Hz	200Hz	150Hz					ft	m	lb	kg	
N319PM19 330V 6000RPM SGL CRD UHT	19	14	14	11	530	410	18.5	0.10	0.33	S	6.9	2.1	110	50	TBA
N319PM29 670V 6000RPM SGL CRD UHT	29	22	22	17	670	510	22.7	0.10	0.33	S	8.5	2.6	161	73	TBA
N319PM43 890V 6000RPM SGL CRD UHT	43	32	32	24	890	680	24.5	0.10	0.33	S	10.5	3.2	209	95	TBA
N319PM54 1010V 6000RPM SGL CRD UHT	54	40	40	30	1010	770	27.0	0.10	0.33	S	12.5	3.8	260	118	TBA
N319PM67 1090V 6000RPM SGL CRD UHT	67	50	50	38	1090	830	31.2	0.10	0.33	S	14.4	4.4	309	140	TBA
N319PM84 1280V 6000RPM SGL CRD UHT	84	63	63	47	1280	970	33.6	0.10	0.33	S	16.4	5.0	359	163	TBA
N319PM105 1440V 6000RPM SGL CRD UHT	105	80	80	60	1440	1100	38.1	0.10	0.33	S	18.4	5.6	408	185	TBA
N319PM120 1620V 6000RPM SGL CRD UHT	120	90	90	68	1620	1240	38.0	0.10	0.33	S	20.3	6.2	459	208	TBA
N319PM268 2680V 6000RPM DBL CRD UHT	268	201	201	151	2680	2010	40.0	0.10	0.33	S	34.8	10.6	768	359	TBA

© NOVAVET
WWW.NOVAVET.COM

PERMANENT MAGNET
MOTOR

JUNE 2014
PAGE 479

ESP CATALOG

319 SERIES

Characteristics of 319 series Permanent Magnet Motor

Model	Frequency range, rpm	Efficiency, %	Power in one section, hp (kW) @6000 rpm
N319PM-6.0	500-6000	89	29-120 (22-90)

Stage	Flow rate	
	bpd	m ³ /day
NBV(250-500)H	189-679	30-108
NB(630-1000)H	377-1258	60-200
NB(1100-1800)H	503-2264	80-360

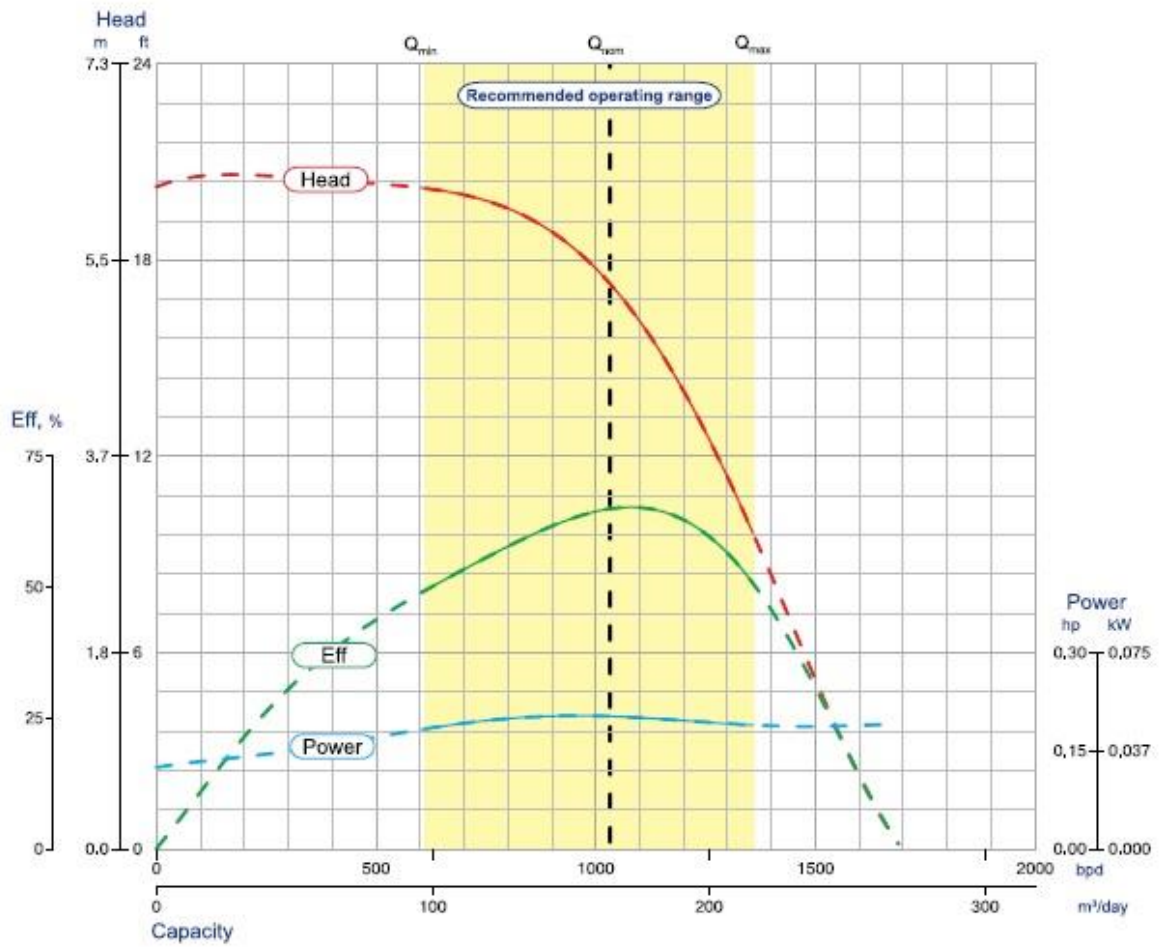


DIAGRAMA EQUIPO BES

CUSTOMER:

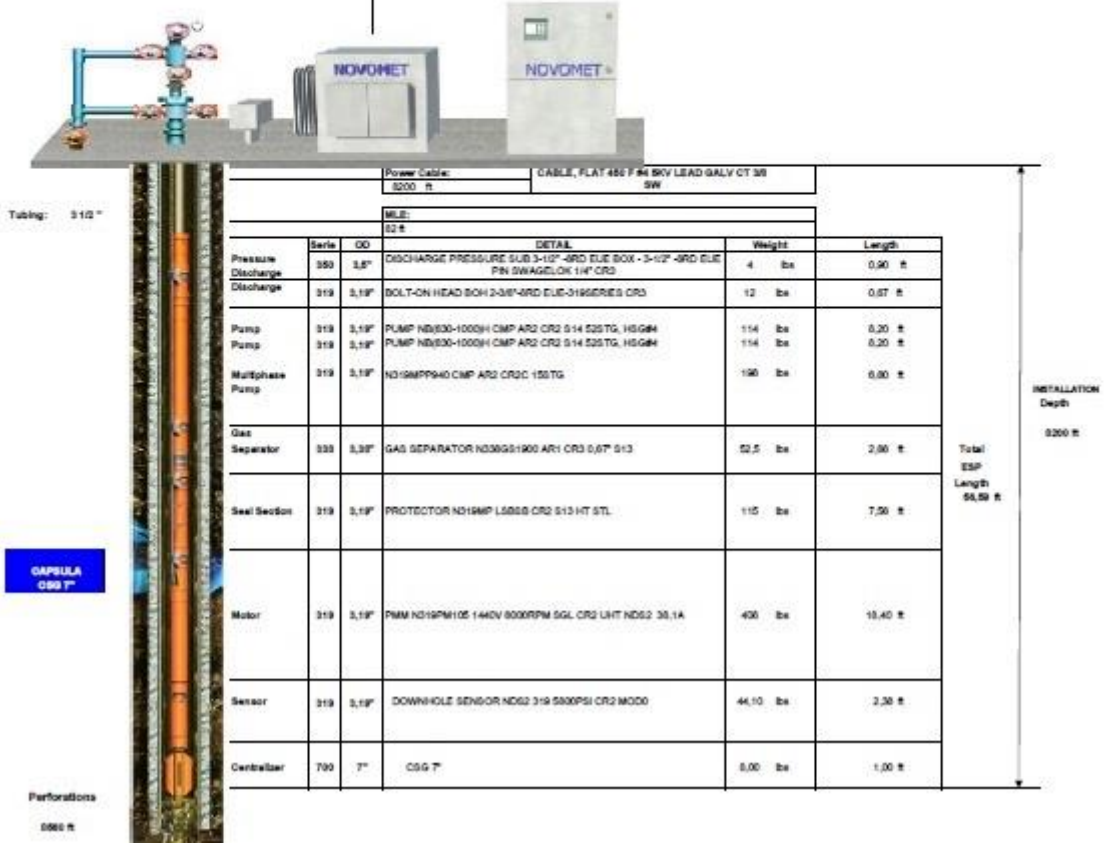
FIELD: CUYABENO

WELL: CUY-68

Flow Rate : 1000 BFPD
 TDH : 3062 ft
 HZ : 60.0 Hz
 Vscrt : 1819 V
 Total Weight: 1073 lbs.

VSD Model
 VARIABLE SPEED DRIVE NNSD 2000VA 480V 60HZ 8P NFD-8 N8WT-8 N8P-8

SU Inver
 XFMR 2000VA 480 PRIMAL TTP SEC



Tubing: 3.125"

CAPILLA
 0.88 7"

Perforations
 0800 ft

Power Cable:		CABLE, FLAT 480 F 3# 8KV LEAD GALV CT 38			
3000 ft		SW			
WELL:					
02 #					
	Series	OO	DETAIL	Weight	Length
Pressure Discharge	390	3.8"	DISCHARGE PRESSURE SUB 3-1/2" 4RD EUE BOX - 3-1/2" 4RD EUE PIN SWAGelok 1 1/4" CR2	4 lbs	0.90 ft
Discharge	319	3.125"	BOLT-ON HEAD BOX 2-3/8" 4RD EUE-3195SERIES CR3	12 lbs	0.87 ft
Pump	319	3.125"	PUMP ND630-1000H CMP AR2 CR2 5-14 525TG, HSG64	114 lbs	0.20 ft
Pump	319	3.125"	PUMP ND630-1000H CMP AR2 CR2 5-14 525TG, HSG64	114 lbs	0.20 ft
Multiphase Pump	319	3.125"	ND19MPP940 CMP AR2 CR2C 150 TG	190 lbs	0.00 ft
Gas Separator	330	3.38"	GAS SEPARATOR N030GSH900 AR1 CR3 0.67" 5-13	52.5 lbs	2.00 ft
Seal Section	319	3.125"	PROTECTOR ND19MP L68ES CR2 5-13 HT STL	115 lbs	7.50 ft
Motor	319	3.125"	PMM ND19PM105 1440V 8000RPM SGL CR2 LHT NDS2 30,1A	400 lbs	15.40 ft
Sensor	319	3.125"	DOWN-HOLE SENSOR NDS2 319 5800PSI CR2 MOD0	46.10 lbs	2.30 ft
Centralizer	700	7"	CSG 7"	8.00 lbs	1.00 ft

INSTALLATION
 Depth
 3200 ft
 Total
 ESP
 Length
 55.59 ft

Technical Specifications

400P12 PUMP

Technical Specifications Effective: December 1, 2004

400 SERIES PUMP MIDDLE TANDEM

HOUSING NO.	LENGTH *		WEIGHT		SND	SHD	SSD
	FT.	M.	LBS.	KG.	NO. STAGES	NO. STAGES	NO. STAGES
1	2.5	0.77	110	50	14	13	10
2	4.0	1.23	155	70	31	28	24
3	5.5	1.68	195	89	48	44	37
4	7.0	2.14	240	109	65	59	50
5	8.5	2.60	280	127	82	74	64
6	10.0	3.05	325	148	99	89	76
7	11.5	3.51	365	166	116	104	88
8	13.0	3.97	410	186	133	119	102
9	14.5	4.43	450	204	150	133	115
10	16.0	4.88	495	225	167	148	128
11	17.5	5.34	535	243	184	163	142
12	19.0	5.80	580	263	201	179	153
13	20.5	6.25	620	281	218	194	167
14	22.0	6.71	665	302	235	209	180
15	23.5	7.17	705	320	252	223	193

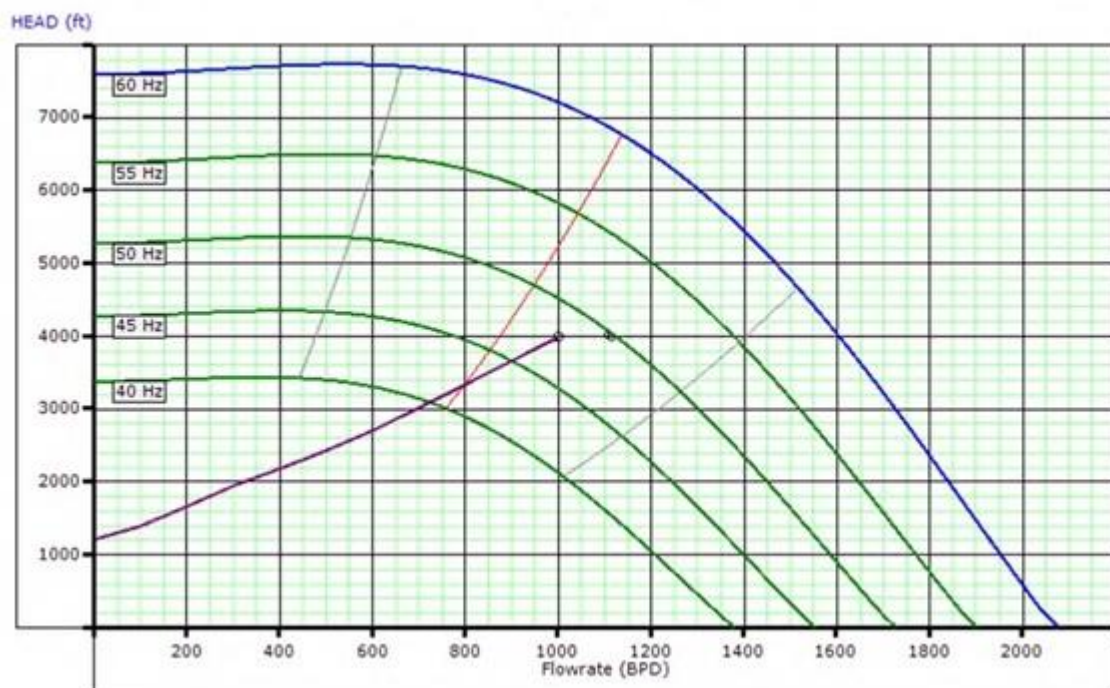
ADDITIONAL MODEL CONFIGURATION OPTIONS (additions to the preceding tables)

MODEL TYPE	MAX. NO. STAGES	LENGTH *		WEIGHT**			
		FT.	M.	LBS.	KG.		
400P	SAME AS TABLES	0.4	0.12	10	4		
400PU		0.2	0.06	4	2		
400PL		0.2	0.06	6	3		

* For shipping length - add 0.2 Feet (0.06 M) per shipping cap.

NOTES

	Intakes, Discharges, Gas Separators and Adapters used on 400 Series Centurion same as for FP pumps.
	All Rotary Gas separators include a Ni-Resist Rotor (N)
1	Maximum flow rate of 4400 BFPD. FRS BHP required = 4.5; FRST BHP required = 9.0 The gas separator to be used with the 400P35, 400P43 & 400P60 requires special order.
2	For use with all 400 series pumps except 400P35, 400P43, 400P60 & some 400P30 pumps.
◆	Contact your Centrilift sales representative.



Technical Specifications

FMH 450 SERIES MOTORS

Technical Specifications Effective: December 1, 2004

450 SERIES MOTOR MODEL FMH

4.50 INCH (114.3 MM) O.D.

SIZE HP		VOLT/AMPS		LENGTH*		WEIGHT	
60 HZ	50 HZ	60 HZ	50 HZ	FT.	M.	LBS.	KG.
15	13	440/22	367/22	4.5	1.37	208	94
23	19	425/35	354/35	5.8	1.77	268	122
31	26	445/45	371/45	7.0	2.13	329	149
31	26	770/26	642/26	7.0	2.13	329	149
39	33	395/64	329/64	8.3	2.53	394	179
39	33	720/35	600/35	8.3	2.53	394	179
46	38	770/39	642/39	9.5	2.89	460	209
46	38	870/35	725/35	9.5	2.89	460	209
54	45	790/45	658/45	10.8	3.28752	521	236
54	45	1020/35	850/35	10.8	3.28752	521	236
62	52	770/53	642/53	12.1	3.68324	586	266
62	52	1170/35	975/35	12.1	3.68324	586	266
77	64	1135/45	946/45	14.6	4.44	707	321
77	64	1465/35	1221/35	14.6	4.44	707	321
93	78	1165/53	971/53	17.1	5.21	843	382
93	78	1760/35	1467/35	17.1	5.21	843	382
116	97	1210/64	1008/64	20.9	6.36	1030	467
116	97	2210/35	1842/35	20.9	6.36	1030	467
132	110	1370/64	1142/64	23.4	7.12	1161	527
132	110	2220/39	1850/39	23.4	7.12	1161	527
155	129	2285/45	1904/45	27.2	8.28	1353	614
185	154	2340/53	1950/53	32.4	10.41	1605	728



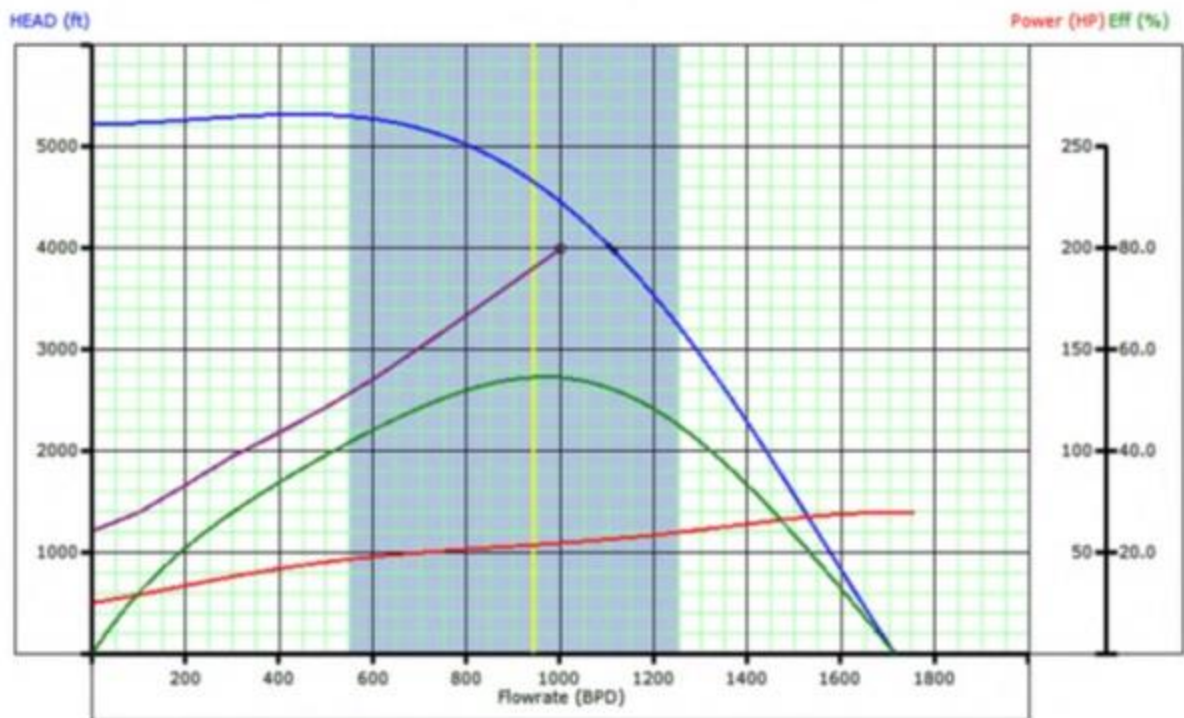


Diagrama de equipo BES

Power Systems Advancing Reservoir Performance

PE1 CUSTOMER:

BLOCK: CUYABENO
FIELD: CUYABENO
WELL: CUYABENO-68

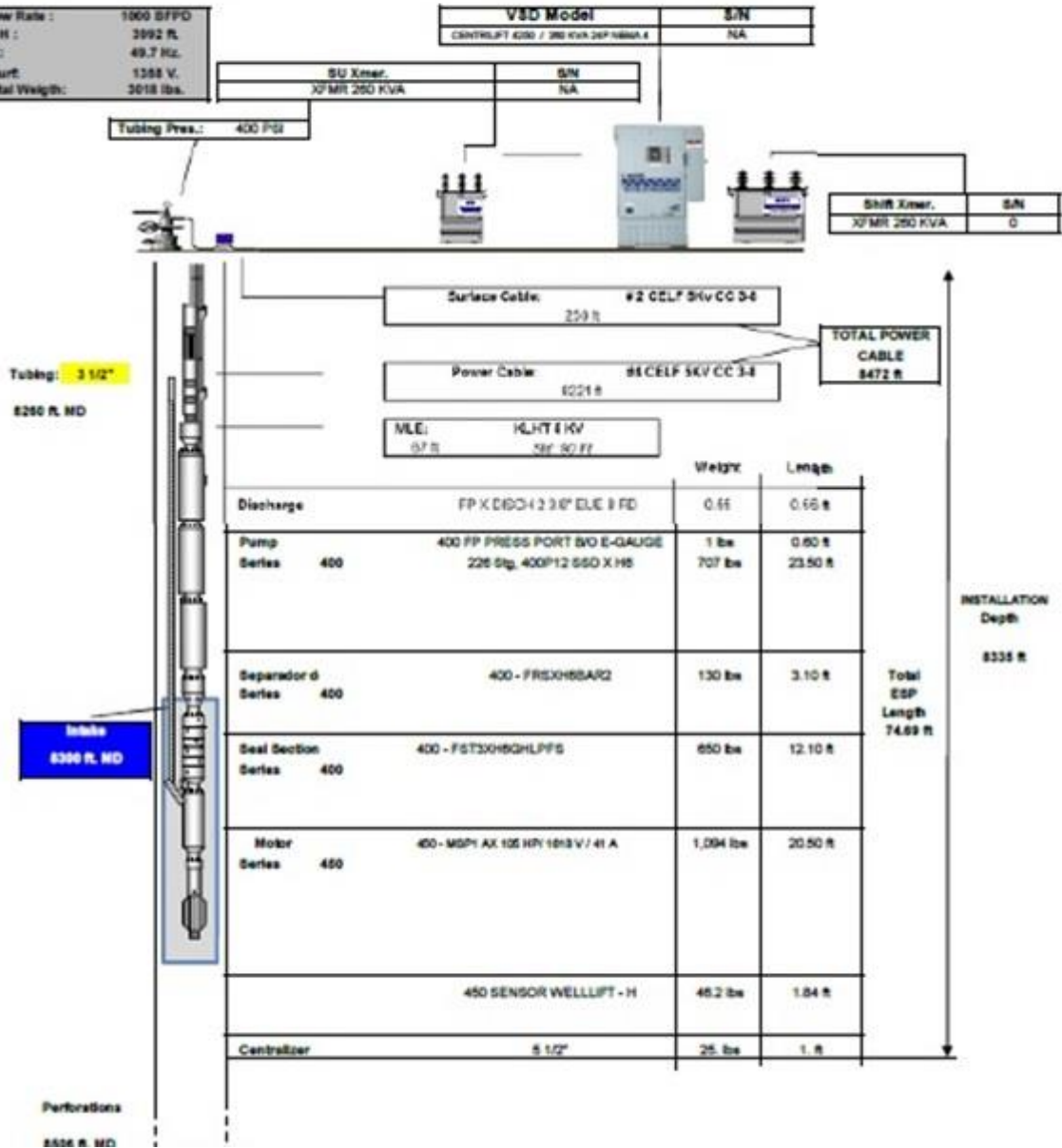
Flow Rate : 1000 BFPD
 TDH : 3992 ft
 RZ: 49.7 ft
 Vsurf: 1355 V
 Total Weight: 3018 lbs.

VSD Model	S/N
CENTROLIFT 4250 / 250 KVA 24P 1800A.4	NA

SU Xmer.	S/N
XPMR 250 KVA	NA

Tubing Pres.: 400 PSI

SHR Xmer.	S/N
XPMR 250 KVA	0



SECRETARIA DE HIDROCARBUROS EXPLORACIÓN Y EXPLOTACIÓN							
PROGRAMA DE COMPLETACION Y PRUEBAS INICIALES DE PRODUCCION							
DATOS GENERALES							
NOTIFICACION AUTORIZACION		<input checked="" type="checkbox"/>					
COMPANIA	BLOQUE	CAMPO	POZO	ARENA	TIPO POZO	FECHA	CLASIFICACION
PETROMAZONAS EP	58	CUYABENO	CUYABENO-88	U INFERIOR	DIRECCIONAL	12-Abr-15	DESARROLLO
ESTRUCTURA	ELEVACION MESA ROTATIVA	PROFUNDIDAD (Pies)		ANGULO MAXIMO DE DESVIACION	PROFUNDIDAD ASENTAMIENTO DE BOMBA		
		TOTAL MEDIDA	VERTICAL V _{VERTICADORA}				
ANTICLINAL	31.6 PIES	8.935.00	8.018.00	31.38° @ 4467'	pies.		
OBJETIVO	COMPLETACION Y PRUEBAS INICIALES						
1. PRUEBA DE PRODUCCION							
PRUEBA	ARENAS		INTERVALOS (Pies)		DIAMETRO CAÑON (Pulg)	N° DISPAROS (psi) DPP	RANURADO C/S
	U inferior		DESDE	HASTA			
			8574	8582	4 1/2"	5	
CARGA TIPO		PENETRACION (Pulg)	DIAMETRO ORFICIO (Pulg)	PIES SATURADOS HC	SW PROMEDIO %	POROSIDAD PROMEDIO %	R _w (phi-m)
HMX		61.6	0.33	8	32	18	0.0614
2. HERRAMIENTAS							
PRUEBA	HERRAMIENTAS DE PRUEBA		TIPO DE SISTEMA DE PRUEBA		INSTALACION DE SUPERFICIE PARA EL CONTROL DE PRUEBA		OBSERVACIONES
1	DISPAROS CON CABLE, BES, TUBERIA, TANQUES		BES		SEPARADOR DE PRUEBA		
3. COSTOS ESTIMADOS DE OPERACION							
COMPANIA	SERVICIO	MATERIAL	INVERSION				
TRIBOLGAS	MOVIMIENTO DE LA TORRE		12.000				
TRIBOLGAS	TRABAJO DE LA TORRE (7 DIAS)		84.000				
TRIBOLGAS	SUPERVISION Y TRANSPORTE		30.000				
NOVOMET	EQUIPO DE SUBSUELO Y SUP		950.000				
NOVOMET	INSTALACION BES		14.000				
NOVOMET	WIRE LINE (REG. CEMENTO)		34.000				
NOVOMET	DISPAROS CON CABLE		24.000				
SOLIPET	SPOOLER + VAC + WIL		14.000				
		CONTINGENCIAS (10%)		110.400			
			SUBTOTAL		1.272.400		
			TOTAL		1.272.400		
Comprobante de depósito No. _____				Valor		Dólares	
Convenio suscrito con el Ministerio de Recursos Naturales No Renovables.						Fecha de Vigencia	
Nombre _____ Ing. Lenin Pozo		Nombre _____ Ing. Ricardo Mosquera					
Firma _____		Firma _____					
Representante de la Compañía Operadora		Técnico responsable					

HISTORIAL DE PRODUCCION CUYABENO - 68



CAMPO CUYABENO POZO CYBC-068UI
 BOMBA PF 3.2 X MOTOR PMM
 TASA 300 ARENA US
 SALINIDAD 2000 ppmCl API 19,1

FECHA	PRESIONES										PRODUCCION REAL										HRS	TIPO DE BOMB
	ARTE	CAR	MA	SEP	BFP	BPM	BAV	BSV	API	H2	AMT	VO	GA	GO	PWI	P. DE	TTR	TTA				
2-mar-15	FINALIZAN OPERACIONES DE PERFORACION A LAS 23H00										INICIAN OPERACIONES DE COMPLETACION Y PRUEBAS INICIALES A LAS 23H00											
19-mar-15	FINALIZAN OPERACIONES DE CUPY A LAS 04H00																					
23-Mar-15	130	36	28	992	446	546	65%	24,7	71	17	1242	70	137	2540	3058	207	217	6	NB (100-1000) H			
24-Mar-15	130	36	28	992	377	615	65%	24,7	71	17	1252	70	186	2579	3092	207	218	6	NB (100-1000) H			
25-Mar-15	130	36	28	992	278	714	75%	29,7	71	16	1253	68	245	2534	3072	207	218	6	NB (100-1000) H			
29-Mar-15	130	36	28	1052	281	721	75%	29,7	71	16	1253	24	86	2534	3072	207	218	4	NB (100-1000) H			
1-Abr-15	160	34	28	1074	301	771	75%	24,7	71	19	1252	78	279	2542	3078	206	215	4	NB (100-1000) H			
4-Abr-15	160	34	28	1052	160	842	84%	24,7	71	18	1440	68	424	2554	3207	206	215	4	NB (100-1000) H			
8-Abr-15	250	34	28	1008	101	907	90%	24,7	71	18	1233	70	894	2565	3207	205	214	4	NB (100-1000) H			
16-Abr-15	200	38	28	960	306	2724	90%	24,7	71	16	1250	38	133	2567	3187	205	212	4	NB (100-1000) H			
17-Abr-15	210	40	28	1110	111	999	90%	24,7	71	16	1252	58	523	2568	3179	205	212	4	NB (100-1000) H			
18-Abr-15	210	40	28	1110	89	1021	95%	24,7	71	16	1253	45	507	2567	3186	205	212	4	NB (100-1000) H			
25-Abr-15	200	38	28	1140	91	1049	95%	29,7	71	16	1252	51	509	2567	3184	205	212	4	NB (100-1000) H			

Reporte de Producción ESP

Energy Performance Advancing Reservoir Performance

NOMBRE DE POZO : CIBC-088 US

SERVICIO TÉCNICO DE CAMPO : HÉROLTO MISE

REPRESENTANTE DE CLIENTE : CARLOS PINEDA

FECHA : 29-May-15 20:00 FWD 3007 3006 203 220

PRUEBA DE ROTACIÓN : 3007 3006 203 220

PRUEBA DE PRODUCCIÓN : 3007 3006 204 222

FECHA	HORA	GIRO	RISE	PS	BLKCH	PS	RISE	Y	MOTOR	Y	PS	RISE	Y	WELL	OUT	VSD (MMP)	VOLT FASE FASE	VOLT FASE TIERRA	AMP MOTOR	BPFD	DSW
PRUEBA DE ROTACIÓN																					
29-May-15	20:00	FWD	3007	3006	203	220	50	400	151-101-159	1436-1432-1434	816-814-812	41-46-45	34-32-35								
PRUEBA DE PRODUCCIÓN																					
29-May-15	20:00	FWD	3004	3074	204	222	45	375	123-118-127	1343-1342-1341	825-827-827	34-34-35	153	100%							
29-May-15	21:00	FWD	2003	3108	205	241	45	375	118-117-124	1343-1342-1341	831-827-827	33-32-34	160	100%							
29-May-15	0:00	FWD	2004	3101	208	242	45	375	111-107-115	1343-1341-1343	831-846-837	30-29-32	203	100%							
29-May-15	1:00	FWD	1999	3100	206	240	45	375	108-107-115	1343-1341-1343	837-840-843	30-30-32	201	100%							
29-May-15	3:00	FWD	1711	3155	206	240	45	375	107-105-113	1341-1342-1341	831-827-827	29-29-31	402	100%							
29-May-15	4:00	FWD	1505	3149	206	240	45	375	105-103-111	1343-1342-1343	837-843-827	29-29-30	230	100%							
29-May-15	5:00	FWD	1345	3144	206	238	45	375	97-95-103	1343-1340-1343	831-843-855	27-26-28	130	100%							
29-May-15	6:00	FWD	1555	3155	203	245	45	375	111-107-115	1343-1342-1343	831-827-827	33-32-34	374	100%							
29-May-15	7:00	FWD	1711	3159	207	246	45	375	118-117-124	1343-1342-1343	831-846-837	34-34-35	45	100%							

PRUEBA EN VACÍO @ 80 HZ

VOLTAJE	120	125	128
VOLTAJE	99	102	105

LECTURAS ELECTRICAS DE ASENTAMIENTO

RESISTENCIA F	7.0	150.140	7.0
---------------	-----	---------	-----

OBSERVACIONES:

Inicio prueba de producción a las 22:00 del 28 de mayo del 2015.

CARLOS PINEDA
MANEJADOR DE CUENTA

FREDDY PANTOJA
COORDINADOR AREA

HÉROLTO MISE
SERVICIO TÉCNICO DE CAMPO

Factores de emisión

- Para calcular las emisiones asociadas, debe aplicarse un factor de emisión de CO₂ atribuible al suministro eléctrico –también conocido como *mix eléctrico* (g de CO₂/kWh)– que representa las emisiones asociadas a la generación eléctrica conectada a la red nacional necesaria para cubrir el consumo.

FUENTE ENERGÉTICA	FACTOR DE EMISIÓN
Electricidad (kWh)	181 g CO ₂ /kWh ⁵⁰
Gas natural (m ³)	2,15 kg CO ₂ /Nm ³
Gas butano (kg)	2,96 kg CO ₂ /kg de gas butano
Gas butano (nº de bombonas)	37,06 kg CO ₂ /bombona (considerando 1 bombona de 12,5 kg)
Gas propano (kg)	2,94 kg CO ₂ /kg de gas propano
Gas propano (nº de bombonas)	102,84 kg CO ₂ /bombona (considerando 1 bombona de 35 kg)
Gasoil (litros)	2,79 kg CO ₂ /l gasoil ⁵¹
Fuel (kg)	3,05 kg CO ₂ /kg de fuel
GLP genérico (kg)	2,96 kg CO ₂ /kg de GLP genérico
Carbón nacional (kg)	2,30 kg CO ₂ /kg de carbón nacional
Carbón de importación (kg)	2,53 kg CO ₂ /kg de carbón de importación
Coque de petróleo (kg)	3,19 kg CO ₂ /kg de coque de petróleo

Emisión de CO ₂ por el consumo energético del motor jaula de ardilla	Emisión de CO ₂ por el consumo energético del motor de imán permanente
$1 \frac{kW}{h} = 181g \text{ de } \frac{CO_2}{kW}$	
$87 \frac{kW}{h} = \text{consumo del motor jaula de ardilla}$	$23 \frac{kW}{h} = \text{consumo del motor de imán permanente}$
$87 \frac{kW}{h} (24h)(365 \text{ días}) = 762.120 \frac{kW}{\text{año}}$	$23 \frac{kW}{h} (24h)(365 \text{ días}) = 201.480 \frac{kW}{\text{año}}$
$R = 762.120 \frac{kW}{\text{año}} * 181g \text{ de } \frac{CO_2}{kW} = 137 T \text{ de } \frac{CO_2}{\text{año}}$	$R = 201.480 \frac{kW}{\text{año}} * 181g \text{ de } \frac{CO_2}{kW} = 36 T \text{ de } \frac{CO_2}{\text{año}}$