



**UNIVERSIDAD ESTATAL PENÍNSULA DE SANTA ELENA  
FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA  
CARRERA INGENIERÍA EN PETRÓLEOS**

**TEMA:**

**“GENERACIÓN DE UN SOFTWARE PARA DETERMINACIÓN DE  
PARÁMETROS EN UN SISTEMA DE LEVANTAMIENTO ARTIFICIAL  
POR BOMBEO ELECTROSUMERGIBLE MEDIANTE LENGUAJE  
MATLAB”**

**TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR**

**AUTOR:**

**OBED ISRAEL ROSERO ORTIZ**

**TUTOR:**

**ING. JOSÉ BALLARDO VILLEGAS SALABARRIA, Ms.C.**

**LA LIBERTAD, ECUADOR**

**2021**

**UNIVERSIDAD ESTATAL PENÍNSULA DE SANTA ELENA**

---

**FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA  
CARRERA DE INGENIERÍA EN PETRÓLEOS**

**TEMA:**

**GENERACIÓN DE UN SOFTWARE PARA DETERMINACIÓN DE  
PARÁMETROS EN UN SISTEMA DE LEVANTAMIENTO  
ARTIFICIAL POR BOMBEO ELECTROSUMERGIBLE  
MEDIANTE LENGUAJE MATLAB**

**TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR**

**AUTOR:**

**OBED ISRAEL ROSERO ORTIZ**

**TUTOR:**

**ING. JOSÉ BALLARDO VILLEGAS SALABARRIA, MSc**

**LA LIBERTAD – ECUADOR**

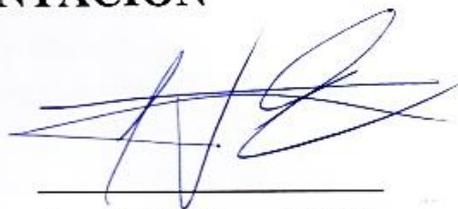
**2021**

## TRIBUNAL DE SUSTENTACIÓN



---

**Ing. Mallerlis Gutierrez Hiestroza, PhD.**  
DIRECTORA DE CARRERA



---

**Ing. José Villegas, M. SC.**  
DOCENTE TUTOR



---

**Ing. Sadi Iturralde, M. SC.**  
DOCENTE ESPECIALISTA



---

**Lcda. Erica Lorenzo, PhD.**  
SECRETARIA DEL TRIBUNAL

Este trabajo de investigación va dedicado a Dios, por bendecir e iluminar mi camino.

Dedico este esfuerzo a mis padres, por el apoyo que siempre han brindado a mi educación.

Además, dedico este trabajo a todas las personas que se involucraron en mi investigación y permitieron que aporte un granito de arena a la parte académica de mi carrera.

NARCISA GARCÍA CAJAPE  
LICENCIADA EN CIENCIAS DE LA EDUCACIÓN  
MÁSTER EN EDUCACIÓN Y DESARROLLO SOCIAL  
DOCENTE DE LENGUA Y LITERATURA - LEXICOLOGÍA

## CERTIFICADO DE GRAMATOLOGÍA

A petición del interesado, tengo a bien certificar que he realizado la revisión y análisis del contenido del presente trabajo de investigación curricular:

**“GENERACIÓN DE UN SOFTWARE PARA DETERMINACIÓN DE PARÁMETROS EN UN SISTEMA DE LEVANTAMIENTO ARTIFICIAL POR BOMBEO ELECTROSUMERGIBLE MEDIANTE LENGUAJE MATLAB”.** Del señor: Obed Israel Rosero Ortiz cédula C.I: 0750152183, egresado de la Carrera de la Universidad Estatal Península de Santa Elena, Facultad de Ciencias de la Ingeniería, Carrera de Ingeniería en Petróleos.

Que el mencionado trabajo, en el contexto general, cumple con los requisitos lingüísticos dados por la Real Academia Española para el uso de idioma español

Certificación, que otorga en la ciudad de Santa Elena, a los quince días del mes de febrero del dos mil veintidós.

CERTIFICA.

Lic. Narcisa García Cajape

C.I. 1307095818

Información Personal						
Identificación:	1307095818	<a href="#">Actualizar información</a>				
Nombre:	GARCIA CAJAPE NARCISA DEL JESUS					
Género:	FEMENINO					
Nacionalidad:	ECUADOR					

Títulos de cuarto nivel o posgrado						
Título	Institución de Educación Superior	Tipo	Reconocido Por	Número de Registro	Fecha de Registro	Observación
MAESTRÍA EN EDUCACIÓN Y DESARROLLO SOCIAL	UNIVERSIDAD UTE	Nacional		1022-18-80010224	2018-02-28	

Títulos de tercer nivel de grado						
Título	Institución de Educación Superior	Tipo	Reconocido Por	Número de Registro	Fecha de Registro	Observación
LICENCIADA EN CIENCIAS DE LA EDUCACIÓN ESPECIALIDAD EDUCACIÓN BÁSICA	UNIVERSIDAD TÉCNICA PARTICULAR DE LEÓN	Nacional		1021-02-210003	2002-04-27	
PROFESORA DE SEGUNDA ENSEÑANZA ESPECIALIDAD EDUCACIÓN BÁSICA	UNIVERSIDAD TÉCNICA PARTICULAR DE LEÓN	Nacional		1021-02-10004	2002-04-27	

# CERTIFICADO DE ANTIPLAGIO

En calidad de tutor del trabajo de investigación para titulación del tema GENERACIÓN DE UN SOFTWARE PARA DETERMINACIÓN DE PARÁMETROS EN UN SISTEMA DE LEVANTAMIENTO ARTIFICIAL POR BOMBEO ELECTROSUMERGIBLE MEDIANTE LENGUAJE MATLAB elaborado por el estudiante OBED ISRAEL ROSERO ORTIZ, egresado de la carrera de Ingeniería en Petróleos, de la Facultad de Ciencias de la Ingeniería, me permito declarar que una vez analizado en el sistema antiplagio URKUND, luego de haber cumplido con los requerimientos exigidos de valoración, la presente tesis, se encuentra con un \_\_\_% de la valoración permitida.

Curiginal

#### Document Information

Analyzed document	Urkund.in.docx (D128488556)
Submitted	2022-04-21T16:44:00.0000000
Submitted by	jose villegas
Submitter email	jvillegas@spw.edu.com
Similarity	0%
Analysis address	jvillegas.spw@analysis.urkund.com

#### Sources included in the report

FIRMA DEL TUTOR



ING. JOSE VILLEGAS SALABARRIA, M. SC.

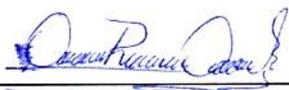
C.I.: 0802495069

# DECLARACIÓN DE AUTORÍA

Yo, Obed Israel Rosero Ortiz, declaro bajo juramento que el presente trabajo de titulación denominado **“GENERACIÓN DE UN SOFTWARE PARA DETERMINACIÓN DE PARÁMETROS EN UN SISTEMA DE LEVANTAMIENTO ARTIFICIAL POR BOMBEO ELECTROSUMERGIBLE MEDIANTE LENGUAJE MATLAB”**, no tiene antecedentes de haber sido elaborado en la Facultad de Ciencias de la Ingeniería, Carrera de Ingeniería en Petróleos, lo cual es un trabajo exclusivamente inédito y perteneciente de mi autoría.

Por medio de la presente declaración cedo los derechos de autoría y propiedad intelectual, correspondientes a este trabajo, a la Universidad Estatal Península de Santa Elena, según lo establecido por la ley de propiedad intelectual, por su reglamento y por la normativa institucional vigente.

Atentamente,



---

OBED ISRAEL ROSERO ORTIZ

Autor de Tesis

C.I. 0750152183

# CERTIFICACIÓN DEL TUTOR

Ing. José Villegas, Ms.C.

## TUTOR DE PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

Universidad Estatal Península de Santa Elena

En mi calidad de Tutor del presente trabajo **GENERACIÓN DE UN SOFTWARE PARA DETERMINACIÓN DE PARÁMETROS EN UN SISTEMA DE LEVANTAMIENTO ARTIFICIAL POR BOMBEO ELECTROSUMERGIBLE MEDIANTE LENGUAJE MATLAB** previo a la obtención del Título de Ingeniero en Petróleos elaborado por el Sr/a. Obed Israel Rosero Ortiz, egresado de la carrera de Petróleos, Facultad Ciencias de la Ingeniería de la Universidad Estatal Península de Santa Elena, me permito declarar que luego de haber orientado, estudiado y revisado, la apruebo en todas sus partes.

FIRMA DEL TUTOR



---

ING. JOSE VILLEGAS, M. SC.  
TUTOR

## **AGRADECIMIENTOS**

A Dios, por ser mi guía y permitir compartir estos momentos de felicidad con toda mi familia.

A mis padres, por el esfuerzo demostrado en brindarme un futuro con mayores oportunidades.

A mis compañeros de clase, por ser testigos del sacrificio y trabajo continuo en nuestro proceso de formación académica.

Y sobre todo un agradecimiento especial, a mis docentes por sus enseñanzas y sabidurías.

# CONTENIDO

	<b>Pág.</b>
<b>CERTIFICADO DE ANTIPLAGIO</b> .....	v
<b>DECLARACIÓN DE AUTORÍA</b> .....	vi
<b>CERTIFICACIÓN DEL TUTOR</b> .....	vii
<b>AGRADECIMIENTOS</b> .....	viii
<b>CONTENIDO</b> .....	ix
<b>LISTA DE FIGURAS</b> .....	xii
<b>LISTA DE TABLAS</b> .....	xiii
<b>RESUMEN</b> .....	xiv
<b>ABSTRACT</b> .....	xv
<b>CAPITULO I: INTRODUCCIÓN</b> .....	16
1.1. Problema de investigación .....	16
1.2. Antecedentes .....	17
1.3. Hipótesis .....	19
1.4. Objetivos .....	19
1.4.1. Objetivo General.....	19
1.4.2. Objetivos Específicos .....	19
1.5. Alcance .....	20
1.6. Variables .....	20

1.6.1. Variables Dependientes .....	20
1.6.2. Variables Independientes.....	20
CAPITULO II: MARCO TEÓRICO.....	21
2.1. Bombeo Electrosurgible .....	21
2.2. Funcionamiento del Sistema Bombeo Electrosurgible.....	21
2.3. Componentes del Sistema de Bombeo Electrosurgible .....	22
2.4. Equipo de Superficie .....	22
2.4.1 Cabezal de pozo.....	22
2.6. Fuentes de energía .....	22
2.7. Transformadores.....	22
2.8. Tipos de transformadores .....	23
2.8.1 Transformador Reductor (SDT) .....	23
2.8.2 Transformador Elevador (SUT).....	23
2.9. Controlador de frecuencia .....	23
2.9 Caja de conexiones eléctricas .....	24
CAPITULO III: METODOLOGÍA.....	33
3.1. Adquisición y Análisis de Datos .....	33
3.2. Conceptos básicos para la instalación y diseño de sistemas de bombeo electrosurgibles.....	28
3.2.1. Diámetro interno, longitud de la carcasa.....	28
3.2.2. Profundidad de los intervalos perforados .....	28
3.2.3. Tamaño y rosca de la tubería de producción.....	29

3.2.4. Gravedad API del aceite, corte de agua y relación gas-petróleo (GOR) .....	29
3.2.5. Gravedad específica de los líquidos y del gas que se va a producir .....	29
3.2.6. Temperatura de fondo de pozo (BHT) .....	29
3.2.7. Presión de cabeza de pozo (THP).....	29
3.2.8. Presión promedio de reservorio (Ps) .....	30
3.2.9. Presión dinámica de fondo (Pwf) .....	30
3.2.10. Índice de productividad (IP) .....	30
3.2.11. Relación de desempeño de flujo (IPR) .....	30
3.2.12. Presión de entrada a la bomba (PIP).....	30
3.2.13. Tensión disponible en superficie (Vs):.....	31
3.2.14. Cálculo de gas.....	31
3.2. Ecuaciones para el diseño del sistema BES.....	35
3.2.1. Relación de gas aceite en solución (Rs) .....	35
3.2.2. Volumen Total de Fluido.....	36
3.2.2. Presión de entrada a la bomba .....	37
3.2.3. Cálculo del cabezal dinámico total en pies (TDH).....	37
3.2.4. Selección del Tipo de Bomba.....	38
3.2.4.1. Determinación del Tamaño Óptimo de Bomba .....	38

## LISTA DE FIGURAS

	<b>Pág.</b>
Figura 1. Esquema Del Equipo Del Sistema De Bombeo Esm. ....	21
Figura 2. Transformador Para Sistema De Bombeo Esm.....	22
Figura 3. Variadores De Frecuencia. ....	23
Figura 4. Bomba Centrifuga. ....	25
Figura 5. Separador De Gas Rotatorio.....	26
Figura 6. Válvula Check. ....	27
Figura 7. Esquema De Metodología. ....	33

## **LISTA DE TABLAS**

**Pág.**

“GENERACIÓN DE UN SOFTWARE PARA DETERMINACIÓN DE  
PARÁMETROS EN UN SISTEMA DE LEVANTAMIENTO  
ARTIFICIAL POR BOMBEO ELECTROSUMERGIBLE MEDIANTE  
LENGUAJE MATLAB”

**Autor:** Rosero Ortiz Obed

**Tutor:** Villegas Salabarría José

**RESUMEN**

En el presente estudio se propuso como objetivo el desarrollo un software libre para cálculo de parámetros que intervienen en el control del diseño de un sistema de levantamiento artificial por bombeo electrosumergible. La investigación que se llevó a cabo fue de tipo aplicada de diseño experimental. Se empleó el software matemático MatLab estableciendo variables: físicas, petrofísicas, productivas y eléctricas de este proceso, obteniendo como resultado una plataforma de programación cuya validación del desempeño estuvo sometida de manera comparativa con los resultados del proceso de diseño de la compañía Baker Hughes.

Para el desarrollo del software se empleó información de la compañía Baker Hughes aplicada al cálculo de parámetros físicos, petrofísicos, productivos y eléctricos que influyen en el diseño y control de la operación. Durante la programación se incluyó el método de Standing y Vogel para conocer el índice de productividad, así como graficas de 4 compañías especializadas en la fabricación de bombas electrosumergibles.

El resultado que se obtuvo es una herramienta computacional que optimiza los tiempos de cálculos que ocupa el operador para conocer el diseño óptimo de un sistema BES, así como el control de los parámetros en tiempo real durante la operación.

**PALABRAS CLAVE:** (levantamiento artificial, electrosumergible, pasos para el diseño, creación de software)

“GENERACIÓN DE UN SOFTWARE PARA DETERMINACIÓN DE  
PARÁMETROS EN UN SISTEMA DE LEVANTAMIENTO  
ARTIFICIAL POR BOMBEO ELECTROSUMERGIBLE MEDIANTE  
LENGUAJE MATLAB”

**Autor:** Rosero Ortiz Obed

**Tutor:** Villegas Salabarría José

**ABSTRACT**

In the present study, the objective was to develop free software for the calculation of parameters that intervene in the control of the design of an artificial lift system by electro-submersible pumping. The research that was carried out was of an applied type of experimental design.

The MatLab mathematical software was used, establishing variables: physical, petrophysical, productive and electrical of this process, obtaining as a result a programming platform whose performance validation was submitted in a comparative way with the results of the design process of the Baker Hughes company.

For the development of the software, information from the Baker Hughes company was used, applied to the calculation of physical, petrophysical, productive and electrical parameters that influence the design and control of the operation. During the programming, the Standing and Vogel method was included to know the productivity index, as well as graphs of 4 companies specialized in the manufacture of electro-submersible pumps.

The result that was obtained is a computational tool that optimizes the calculation times that the operator occupies to know the optimal design of a BES system, as well as the control of the parameters in real time during the operation.

**KEYWORDS:** (Artificial lift, Electrosuimmersible, Design steps, Software creation)

# **CAPITULO I: INTRODUCCIÓN**

En la actualidad se observa un auge respecto a la creación de empresas que se enfocan en el desarrollo tecnológico, las cuales se encuentran distribuidas en distintos sectores, ofreciendo sus servicios en el desarrollo de plataformas virtuales y soluciones informáticas, ofrecen de esta manera a sus clientes una alternativa de potenciar sus modelos de negocios (Fajardo y Riola, 2021); la industria petrolera no ha sido la excepción y ha implementado estas ideas en los distintos sectores en los que se ha requerido.

El presente trabajo de investigación tiene la finalidad de realizar un software que facilite el cálculo de una serie de procedimientos que se utilizan en un sistema de levantamiento artificial por bombeo electrosumergible, implicando en este el cálculo de variables físicas, propiedades de la roca, parámetros de tipo petrofísico, productividad y eléctricos de la bomba. El operador ejecutará estos cálculos de manera más eficiente en este sistema integrado, diseñado y planificado para satisfacer los requerimientos y estimaciones de manera lógica y ordenada.

Mediante la creación de este software se busca reducir el tiempo en procesos de cálculos que como en toda industria influyen en el servicio ágil del operador, previniendo así errores humanos inevitables, en particular la lectura errónea de gráficas, disminuir el tiempo en la toma de decisiones y otros factores como poseer gráficas acertadas y tenerlas en buena condición. Este software podrá ser incorporado y ejecutado en cualquier tipo de computadora, ayudando así consecuentemente a llevar un control cuantitativo de la producción y demás parámetros vinculados en el diseño BES en el pozo en tiempo real de operación.

## **1.1. PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN**

En la industria petrolera existen diversos softwares como NOVOMET y LOWIS en los que se pueden realizar modelados y/o simulaciones los cuales tienen la posibilidad de

contribuir en la comprensión de los fenómenos físicos que gobiernan el proceso de producción en los pozos, en su mayoría no se encuentran predeterminados en idiomas para países hispanohablantes, además que al considerarse estos costos, los mismos resultan elevados, considerando la diferencia de estatus económico respecto a la posición geográfica para lograr su compra, a su vez la mayoría de estos presentan interfaces que no facilitan su uso.

Se considera modelo a la representación simplificada de un sistema, en el que se detallan las variables dependientes e independientes que por su interés han sido seleccionadas, en el área de investigación científica, dichos modelos se han empleado en distintas disciplinas, logrando enriquecer el conocimiento de las características y el manejo de los sistemas o recursos valorados. (Candelaria, y otros, 2011) No existe un software de uso libre que abarque un proceso completo para el cálculo por diseño de bombeo electrosumergible que incluya, incorporando así un patrón de referencia en busca de la solución.

El proceso de cálculo de un sistema de bombeo electrosumergible, puede ser descrito por ecuaciones de cálculo que toman mucho tiempo, y particularmente se realizan algunas iteraciones convirtiéndolo en un gran problema.

## **1.2. ANTECEDENTES**

De acuerdo con Abarca y Núñez (2015), la producción de hidrocarburos conlleva una caída de presión en el reservorio, por lo que es necesario aportar energía externa para elevar la columna de flujo desde los reservorios hasta el centro de acopio, eligiendo un método de levantamiento artificial, implementado en ciertos pozos, secundarios o terciarios.

Además del bombeo mecánico, el sistema BES es uno de los sistemas más comúnmente usados en todo el mundo: este sistema de levantamiento artificial se usa en pozos que producen grandes cantidades de crudo liviano a mediano; Resultó ser uno de los mejores, ya que su frecuencia y velocidad se pueden cambiar desde la superficie (Merino, 2019).

Gutiérrez y Rojas (2018), en el trabajo titulado “Desarrollo de un software para el cálculo del nivel dinámico de fluido de un pozo mediante los datos de torque de varilla en un sistema de levantamiento artificial por bombeo de cavidades progresivas PCP”

ofrecieron una alternativa para el cálculo de este nivel, creando un software que, mediante cálculos y ecuaciones, permite obtener datos sin inversión adicional. El software se creó utilizando el lenguaje QML, que se basa en Java Script. Para su verificación, se realizaron pruebas y se compararon con los datos obtenidos del Echometer, resultando en una clara similitud y una baja tasa de error. Como resultado obtuvieron un software que permite el muestreo dinámico del nivel de fluido del pozo en el momento y lugar donde la empresa lo necesite, sin tener que trasladar personal al pozo. Un pequeño porcentaje de errores están asociados con el analizador de Pozo Echometer.

Por su parte, Gualdrón y Reales (2015), realizaron un trabajo titulado “Implementación de una estrategia de control difuso para aumentar la producción de crudo en pozo petrolero” esta disertación propone una estrategia de control que se enfoca en la producción de crudo en un sistema de bombeo eléctrico sumergible utilizando un controlador difuso implementado en un PLC. Durante la fase de identificación del proceso, se obtienen datos de un pozo de producción en bruto, que se utiliza para modelar el sistema y así determinar las variables que determinan el proceso. A través de Matlab se realizó el desarrollo y la configuración del controlador difuso para utilizando el software de diseño difuso y el PLC ControlLogix L61. El resultado ha sido que la contestación de la salida difusa del controlador en el PLC Allen Bradley ha sido la esperada, con la señal de control ajustada al punto de ajuste esperado. Sin embargo, la respuesta debe ajustarse mediante el software Fuzzy Designer V16 de Rockwell Automation Online para que se encuentre dentro del rango deseado.

Asimismo, el trabajo realizado por Salgado, et al., (2011), tuvo como objetivo principal diseñar un software para identificar dinagramas de fondo, el programa se considera una red neuronal entrenada para identificar errores asociados con el dinagrama de fondo de un sistema de bombeo de tipo mecánico, tiene una interfaz gráfica de usuario que permite al analista u operador ver todas las diferentes formas de cartas dinagráficas que aparecen en un campo de múltiples pozos dado, adicionalmente destaca el hecho que el código del programa fue desarrollado en Matlab y maneja 16 fallas diferentes. Como resultado, se encontró que el sistema desarrollado puede identificar con precisión algunos de los problemas más comunes y es una herramienta que los ingenieros y el personal de mantenimiento utilizan en su trabajo diario con sistemas de bombeo mecánico.

## **Software Lowis para monitoreo en tiempo real**

LOWIS es un instrumento programación que se desarrolló para mejorar la eficiencia y efectividad en los procesos de administración de pozos en tiempo real con alarmas, brinda así un enfoque que se encuentra incluido en el comportamiento de la zona periférica del pozo, que posibilita al operador examinar alguna mediación para optimizar la productividad del campo (Weatherford, 2008).

## **NOVOMET, compañía enfocada en el desarrollo de automatización de procesos de instalación en un sistema BES.**

Las nuevas tecnologías representan una cuarta parte de los pedidos ejecutados y entregados por Novomet. La mayoría de estos sistemas de producción innovadores no tienen competencia directa en Rusia y muchos ni siquiera tienen nada que se les parezca en el mundo. Un buen ejemplo de esto es nuestro sistema de bombeo electrosumergible (BES) PowerSave, que proporciona de 25 a 30% más de eficiencia que el sistema del competidor más cercano. Esta tecnología disminuye la potencia que es necesario para producir petróleo, lo que disminuye el costo total por barril y aumenta la vida útil reduciendo el calentamiento y las vibraciones de las BES (NOVOMET, 2022).

### **1.3. HIPÓTESIS**

Mediante la creación del software en lenguaje MatLab, para el control de parámetros en un diseño BES, se pretende desarrollar una herramienta que posea una eficacia en sus resultados del 99%, considerando un margen de error del 1% en los mismos.

### **1.4.OBJETIVOS**

#### **1.4.1. Objetivo General**

Elaborar un software para determinación de los parámetros físicos, petrofísicos, productivos y, eléctricos mediante la aplicación de lenguaje MatLab.

#### **1.4.2. Objetivos Específicos**

- Identificar las ecuaciones para la determinación de las variables de diseño de un sistema BES, para el desarrollo del software.
- Desarrollar el programa para la automatización de cálculos, mediante el ingreso de códigos de programación de las ecuaciones a ejecutar.

- Evaluar el desempeño del software mediante la validación de expertos en el área de programación y producción.

## **1.5. ALCANCE**

Para la creación del software en lenguaje MatLab, se usarán códigos de programación en los que se ingresan ecuaciones de ALS para BES.

El presente software de automatización de parámetros BES, pertenece legalmente a la institución: Universidad Estatal Península de Santa Elena, y servirá de apoyo para el conglomerado estudiantil que requiera su uso y aplicación.

## **1.6. VARIABLES**

### **1.6.1. Variables Dependientes**

- Creación de software

### **1.6.2. Variables Independientes**

- Parámetros petrofísicos
- Criterios de selección de tipo de pozos

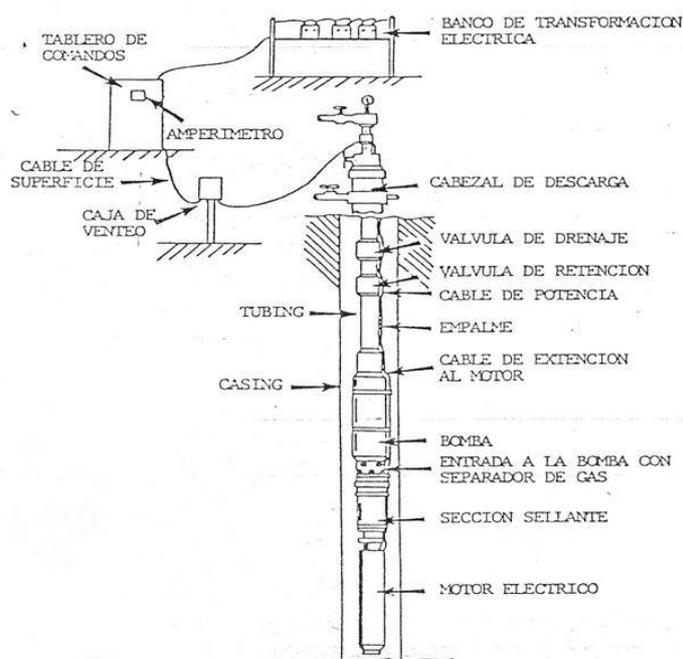
## CAPITULO II: MARCO TEÓRICO

### 2.1. BOMBEO ELECTROSUMERGIBLE

La primordial funcionalidad del bombeo electrosumergible es cambiar la energía provista por un motor primario en energía dentro del líquido que se bombea. Esta energía contenida se presenta como energía de presión. (Peñañiel, 2015).

### 2.2. FUNCIONAMIENTO DEL SISTEMA BOMBEO ELECTROSUMERGIBLE

De acuerdo con Baby, et al., (2004) se fundamenta en un método de levantamiento artificial que emplea una bomba centrífuga ubicada en el subsuelo para levantar los fluidos que aporta el yacimiento desde el fondo del pozo hacia la estación de flujo, además se compone por un motor eléctrico trifásico, una sección sellante llamada protector, mientras que en área se necesita de un banco de transformadores y un panel de control para proporcionar la energía y controles apropiados al equipo de fondo.



**Figura 1. Esquema del equipo del Sistema de Bombeo ESM. Fuente: Tomado de (Vargas, 2021).**

## **2.3. COMPONENTES DEL SISTEMA DE BOMBEO ELECTROSUMERGIBLE**

El sistema de bombeo electrosumergible se encuentra dividido en dos secciones: un equipo de fondo y uno de superficie (Lanfranchi, 2016).

### **2.4. Equipo de Superficie**

#### **2.4.1 Cabezal de pozo**

Tiene como funcionalidad mantener todos los accesorios de fondo (motor, sello, bomba, cable), de igual forma la tubería de producción y posibilita pasar por medio del mismo el conector que junta el cable de superficie con el cable de subsuelo (Baby, et al., 2004).

### **2.6. Fuentes de energía**

El primordial medio para la producción de potencia eléctrica en un campo es un generador de corriente alterna (AC). Estos generadores transforman la energía mecánica en energía eléctrica la cual es después transmitida por el sistema de transmisión y distribución (Vargas, 2021).

## **2.7. TRANSFORMADORES**

El transformador es una herramienta eléctrica que se encarga de modificar el voltaje de salida ya sea para reducirlo o elevarlo (Pérez, 2001).



**Figura 2. Transformador para Sistema de Bombeo ESM. Tomado de ABB, 2021.**

## 2.8. TIPOS DE TRANSFORMADORES

El tipo de transformador que se requiere depende del sistema de potencia primario y del voltaje requerido en superficie (Pérez, 2001).

### 2.8.1 Transformador Reductor (SDT)

Se usa en situaciones donde la energía suministrada al sistema nace de líneas de alta tensión. Este transformador disminuirá el voltaje de la línea al voltaje solicitado por el acceso del controlador; si la energía nace de generadores, dichos generadores otorgan de manera directa el voltaje solicitado por el controlador de frecuencia o el panel de control (Pérez, 2001).

### 2.8.2 Transformador Elevador (SUT)

Se incrementa el voltaje que sale del controlador de frecuencia a los requerimientos del motor para que opere eficientemente. Estos transformadores son trifásicos y aumentan el voltaje desde un sistema de 480 voltios a rangos de 800 a 4000 voltios (Pérez, 2001).

## 2.9. CONTROLADOR DE FRECUENCIA

La flexibilidad del sistema de bombeo electrosumergible posibilita la aplicación de un controlador a frecuencia variable (VSD), el cual es un dispositivo electrónico que cambia la frecuencia de la corriente que llega al motor y por consiguiente se puede incrementar o reducir la rapidez de la bomba.



**Figura 3. Variadores de frecuencia. Tomado de Ceica, 2021.**

## **2.9 CAJA DE CONEXIONES ELÉCTRICAS**

La caja se encuentra ubicada en la cabeza de pozo y el tablero de control por razones de estabilidad. Cumple una función elemental que es suministrar venteo a la atmósfera del gas que pudiese haber emigrado por medio del cable de potencia, provee un punto de simple ingreso para hacer pruebas y de esta manera verificar las condiciones eléctricas del equipo que se encuentra el fondo, además se considera un punto de conexión entre el cable de potencia que viene desde el tablero de control y el cable de potencia que viene del motor (Lanfranchi, 2016).

### **2.1 EQUIPO DE FONDO**

#### **2.1.1 Motor eléctrico sumergible**

Los motores que se utilizan en las operaciones son de dos polos, trifásicos, jaula de arcilla y de tipo inducción (Jutglar y Galán, 2012).

Se diseñada según el criterio de los parámetros de potencia de cada fase, el gradiente de fluido y por consiguiente la cabeza total dinámica a levantar. Estos motores son llenados con un aceite mineral potencialmente refinado y con una elevada resistencia dieléctrica (Jutglar y Galán, 2012).

El motor se encuentra compuesto de un rotor normalmente de 12 a 18 pulgadas de largo, se encuentra localizado a lo largo de un eje que es revestido por un estator que, al inducirse una corriente a través de él, acciona un campo magnético (Jutglar y Galán, 2012).

Asimismo, Jutglar y Galán (2012) agregan que el estator está compuesto de un conjunto de arreglos de electroimanes individuales, los cuales en conjunto forman un cilindro hueco con un polo de cada electroimán hacia dirigido hacia el centro. El rotor gira empieza a girar por la atracción magnética y repulsión a medida que los polos procuran seguir el campo eléctrico rotatorio accionado por el estator.

#### **2.5.2 Sello**

La sección sellante o protector está localizado entre la sección de entrada a la bomba y el motor. El protector es una pieza fundamental en el ensamble y si no es seleccionada apropiadamente puede disminuir la vida útil del equipo (Lanfranchi, 2016).

### 2.5.3 Entrada a la bomba

El acceso a la bomba o (Intake) se estima un ensamblaje mecánico por medio del cual circula el fluido desde el pozo al interior de la bomba, además funciona para darle soporte al rodamiento que absorbe los esfuerzos axiales que transfiere el eje (Vargas, 2021).

### 2.5.4 Bomba centrífuga

Está compuesta por un determinado número de etapas, cada etapa en sí permite bombear un caudal determinado por el diseño de la misma, la exigencia de cabeza que se requiere levantar va a determinar el número de etapas que se emplearán en la operación (Mott, 2006).



**Figura 4. Bomba Centrífuga.** Tomado de bombascentrifugas.net, 2021.

Las bombas electrosumergibles son centrífugas multi-etapas. Cada etapa se define en un impulsor rotativo y un difusor estacionario. El paso para llevar de una energía cinética a una energía de presión es conseguido cuando el líquido que se encuentra siendo bombeado rodea el impulsor y como el impulsor gira a alta velocidad éste le transmite una moción rotatoria al líquido (Baby, et al., 2004). La moción transmitida por el impeller al líquido de acuerdo con Lanfranchi, (2016) es de dos tipos:

- Radial debido a los esfuerzos centrífugos y donde el líquido buscará ser movilizado a partir del centro hacia la periferia del impulsor.
- Tangencial al diámetro exterior del impulsor.

La resultante entre estas dos fuerzas se conoce como la dirección de flujo accionada por la bomba.

### 2.5.5 Cable de potencia

La potencia es transmitida al motor electrosumergible desde una línea de cable eléctrico trifásico que se encuentra anexado a la tubería de producción, este cable debe ser pequeño (depende de la potencia requerida, puede ser No. 1, No. 2 ó No. 4) en diámetro, el cual debe estar protegido de esfuerzos mecánicos y eventualidades que puedan deteriorar sus propiedades en el fondo del pozo

Para la selección del tipo de cable el criterio se encuentra fundado específicamente sobre las condiciones de fluidos, como temperatura de fondo y las condiciones del espacio anular; cuando existe el suficiente espacio anular se usa el cable de configuración redonda, mientras que el cable de configuración plana debe ser usado cuando existan condiciones en el espacio anular (Lanfranchi, 2016).

### **2.5.6 Separador de gas rotatorio**

El separador de gas acopla el protector o sello y la bomba, permitiendo así la producción de pozos con un alto valor de GOR (mayor o igual al 200 PCS/Bbl) el cual disminuye el volumen de gas libre en el momento de pasar por la bomba (Lanfranchi, 2016).

El fluido ingresa al separador y es llevado hacia una cámara centrífuga por la acción de un inductor y una columna de baja succión. Cuando se encuentra en la centrífuga el fluido con alta gravedad específica es llevado en dirección al exterior de la pared de la cámara rotatoria por fuerza centrífuga dejándolo cerca del centro. El gas es repartido por el separador de fases y luego es vaciado de regreso al anular del pozo donde éste asciende (Lanfranchi, 2016).



**Figura 5. Separador de Gas rotatorio. Tomado de Novomet, 2021.**

## 2.2 ACCESORIOS DE FONDO

### 2.6.1 Válvula Check

Localizadas dos o tres uniones por encima de la bomba, puede ser usada para conservar la tubería llena de fluido cuando se para la bomba, impidiendo el giro invertido de la misma, y protegiéndola de daños en casos del arranque del motor después de lapsos cortos de tiempo (Baby, et al., 2004).



Figura 6. Válvula Check. Tomado de [larocamadrehg.blogspot.com](http://larocamadrehg.blogspot.com), 2021.

### 2.6.2 Válvula de drenaje

Se encuentra localizada por encima de la válvula check, se utiliza para admitir el paso del fluido desde la tubería de producción hacia el espacio anular, cuando se saca tubería, de esta forma impedir tener la tubería con total fluido durante las reparaciones (Baby, et al., 2004).

### 2.6.3 Cable plano

Se utiliza generalmente para efectuar la conexión desde la bomba por medio del separador de gas y sello hasta el motor, donde se presencia limitaciones de diámetro (Jutglar & Galán, 2012)

### 2.6.4 Centralizadores

Son usados para centrar el motor y la bomba, para favorecer el enfriamiento y en ciertos casos para prevenir daños debidos al rozamiento durante la instalación. Se usan especialmente en pozos desviados (Lanfranchi, 2016).

### **2.6.5 Protectores de caucho**

Conserva la parte externa de la tubería de producción.

### **2.6.6 Bandas de cable plano**

Se utilizan con el fin de fijar el cable plano a la bomba, el separador de gas y el sello; colocando una sección cada 6 pies

## **3.2. CONCEPTOS BÁSICOS PARA LA INSTALACIÓN Y DISEÑO DE SISTEMAS DE BOMBEO ELECTROSUMERGIBLES**

Para garantizar que un sistema de bombeo electrosumergible sea adecuado para un pozo en particular, existe un mínimo de entradas que deben ser confiables y actualizadas para realizar el dimensionamiento correcto. Este conjunto de datos requeridos se presenta a continuación y se da una breve introducción a su función y / o definición (Abarca & Nuñez, 2015).

### **3.2.1. Diámetro interno, longitud de la carcasa**

Se debe conocer la longitud de la carcasa y su diámetro interior para que la bomba eléctrica sumergible encaje en la carcasa (Vargas, 2021).

### **3.2.2. Profundidad de los intervalos perforados**

Es necesario conocer la profundidad de los intervalos perforados para poder instalar el equipo de superficie a una altura que permita una adecuada circulación de crudo a su alrededor, teniendo en cuenta también que el fluido de formación es el encargado de enfriar el motor, si hay alguno, en funcionamiento. Debido a que el motor depende del flujo de fluido de pozo para su enfriamiento, un sistema BES estándar nunca debe colocarse por encima o por debajo de un pozo o área de producción, a menos que el motor esté encamisado (Vargas, 2021).

### **3.2.3. Tamaño y rosca de la tubería de producción**

La longitud de la tubería es de gran importancia para calcular las pérdidas por fricción que deben tenerse en cuenta en el diseño. Para calcular la altura en pies que requiere recorrer una bomba para trasladar fluido hasta la superficie de abajo, se utiliza el valor por pérdida de fricción que compone uno de los tres parámetros. El tipo de rosca y el tamaño de la tubería se utilizan para seleccionar el tipo de rosca adecuado para varias válvulas, acoplamientos y cabezales de pozo (Mott, 2006).

### **3.2.4. Gravedad API del petróleo, corte de agua y relación gas-petróleo (GOR)**

Mide la densidad de los fluidos producidos en el pozo y ayuda a determinar la potencia requerida por la bomba para elevar el petróleo desde el interior del pozo hasta la superficie (Mott, 2006).

### **3.2.5. Gravedad específica de los fluidos y del gas que se va a producir**

Estos parámetros permiten calcular la potencia que se necesita para producir el fluido, el cual es una mezcla de agua, petróleo y gas en determinados casos (Mott, 2006).

### **3.2.6. Temperatura de fondo de pozo (BHT)**

Proporciona como guía cuánto puede enfriarse el motor con el fluido producido y es una información importante a la hora de elegir el equipo que se utilizará (Abarca & Nuñez, 2015).

### **3.2.7. Presión de cabeza de pozo (THP)**

Es la presión con la que debe escapar el fluido de proceso para llegar a una estación de recolección o batería. Este parámetro se requiere en el cálculo de la altura dinámica total (TDH) (Lanfranchi, 2016).

### **3.2.8. Presión promedio de reservorio ( $P_s$ )**

La presión estática, que se extiende a una distancia del pozo igual al radio de drenaje ( $r_e$ ), se considera como la presión promedio del yacimiento. Si las distancias son superiores que  $r_e$ , la presión permanece siendo constante. El valor requerido de presión puede ser tomado de ensayos de formación de tipo Drawdown (Lanfranchi, 2016).

### **3.2.9. Presión dinámica de fondo ( $P_{wf}$ )**

Esta es la presión que se produce sobre la superficie de la formación, es decir, sobre las paredes del pozo en el que se ubican las perforaciones. Esto se puede lograr mediante pruebas de formación, perfiles de presión o sensores de superficie (Lanfranchi, 2016)

### **3.2.10. Índice de productividad (IP)**

La relación entre la producción de pozos y el Drawdown se conoce como índice de productividad (IP). A menos que se indique lo contrario, el IP se basa en la producción neta de líquido (agua, aceite). Le permite determinar la productividad de un pozo al crearse una caída de presión en él (Abarca & Nuñez, 2015).

### **3.2.11. Relación de desempeño de flujo (IPR)**

Se establece como la interacción funcional entre el rendimiento y la presión dinámica sobre el suelo. Para poder especificar el valor IPR se debe considerar el intervalo que va desde la presión promedio en el yacimiento hasta la presión atmosférica. Asegura que el dispositivo no se encuentre ni sobredimensionado ni insuficientemente diseñado (Abarca & Nuñez, 2015).

### **3.2.12. Presión de entrada a la bomba (PIP)**

Al operar bombas sumergibles, es extremadamente importante determinar el nivel de líquido por encima de la bomba o la presión en la entrada de la bomba al pozo. Porque la PIP es responsable de proporcionar la altura necesaria para permitir que el líquido fluya a través de la abertura del primer impulsor. Se considera dos presiones de entrada a la bomba (Vargas, 2021).

a) Presión de entrada a la bomba requerida

Esta es la presión de entrada que se requiere para alimentar correctamente la bomba y evitar la cavitación o el atrapamiento de gas. Conocida también como la N.P.S.H (Cabeza de succión neta positiva) requerida.

b) Presión disponible de entrada a la bomba

Es la presión de operación de instalación en particular.

### **3.2.13. Tensión disponible en superficie (Vs):**

Es el rango de tensión que se tiene disponible para mantener la relación  $V/f$ .

### **3.2.14. Cálculo de gas**

Para saber si es necesario instalar equipos adicionales que ayuden con la regulación del suministro de gas, es necesario calcular la cantidad de gas en la entrada a la bomba, ya que la presencia de este gas provoca constantes fluctuaciones en la densidad y presión del petróleo crudo en el sistema. En diversas ocasiones, es algo difícil determinar con total exactitud esta relación de gas. Hay una serie de ecuaciones, mejor conocidas como correlaciones de Standing, para la relación gas-petróleo y el factor de volumen del yacimiento (Vargas, 2021).

### **Software libre**

La FSF (Free Software Foundation) propugna como factor clave para la definición de software libre, la libre oportunidad de los usuarios para lograr realizar, simular, aprender, mejorar y redistribuir el software. El término clave aquí es independencia. Independencia de utilizar el programa para cualquier objetivo, de aprender cómo funciona y adaptarlo a las diversas necesidades, de compartir copias, de poder mejorarlo y de hacer públicas las mejoras. La exclusiva restricción es que si redistribuimos el software, se debe que realizarlo reconociendo los mismos derechos en los usuarios de nuestras propias modificaciones. Como podemos observar, para tener acceso al código original es un requisito previo y primordial para ejercer la mayor parte de estas libertades. Las cuales fueron propuestas de la siguiente manera:

- Libertad 0. Es la independencia de utilizar el software para cualquier finalidad.

Libertad 1. La independencia de estudiar y analizar la funcionalidad del software y acondicionarlo a las propias necesidades. El acceso al código fuente es una condición para que se dé esta libertad.

- Libertad 2. La independencia de compartir copias, las veces que considere necesaria

Libertad 3. La independencia de renovar el software y compartir de manera pública las mejoras, de esta manera que la comunidad pueda beneficiarse de su publicación.

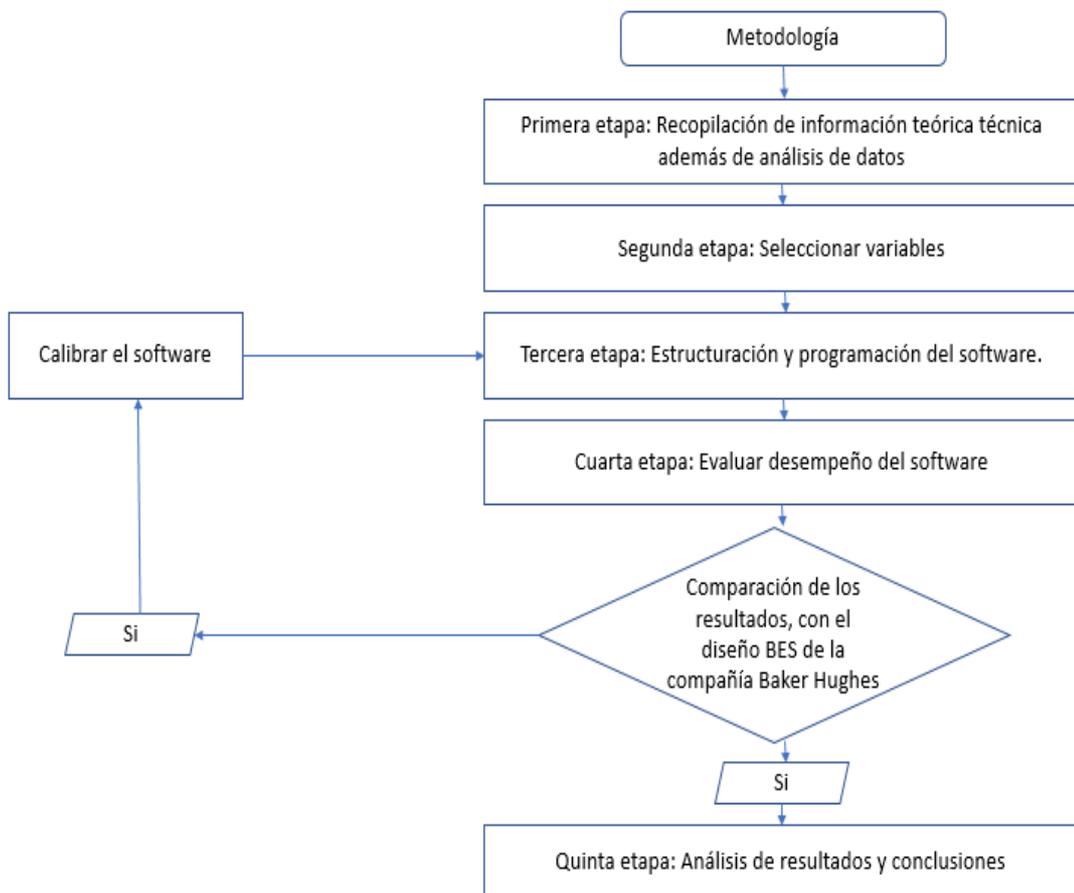
Asimismo, podemos definir como un software libre a aquel programa que logre cumplir con estas cuatro libertades (Adell & y Bernabé, 2007)

# CAPITULO III: METODOLOGÍA

Este capítulo contiene la información mínima y las ecuaciones básicas utilizadas por los ingenieros petroleros para diseñar sistemas de bombas eléctricas sumergibles. Además, muestra las ecuaciones y criterios propuestos para la identificación de los equipos eléctricos en los que se basa la herramienta software desarrollada en este proyecto.

## 3.1. ADQUISICIÓN Y ANÁLISIS DE DATOS

En este capítulo también se detallan los procedimientos en los que se basa el desarrollo y profundización de esta tesis, por lo que estos procedimientos se presentan en una secuencia ordenada de 5 pasos, como se muestra en la figura a continuación.



**Figura 7. Esquema de Metodología.**

En primer lugar, se recopiló información sobre el funcionamiento estándar de la bomba, las variables de influencia más importantes en el funcionamiento y su comportamiento

en caso de errores, como resultado de lo cual se identificaron tendencias en el cambio de los parámetros transmitidos por el sensor de la bomba.

La recopilación de datos es la base para el desarrollo de software y, por lo tanto, para la aplicación exitosa de un modelo de pronóstico. Asegurar la recopilación de datos relevantes y su calidad y confiabilidad se consideró uno de los objetivos más importantes para lograr una automatización de cálculos eficaz.

Para dicho fin, se consideró conveniente realizar un compendio de información en el que se condensa, tanto información de manuales y bibliografía técnica, como información adquirida empíricamente.

Mediante la síntesis y contraste de la información recopilada, se estipuló la data solicitada para llevar a cabo el control del diseño del sistema de bombeo electrosumergible descrita en la tabla 1.

Tabla 1. Data de Entrada para el Modelo de Simulación

<b>Datos</b>	<b>Descripción</b>
<b>Estado mecánico del pozo</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Dimensiones y características del tubing.</li> <li>• Tipo de bomba</li> <li>• Número de etapas</li> <li>• Profundidad del pozo (tvd) (ft)</li> <li>• Profundidad de asentamiento de la bomba (ft)</li> </ul>
<b>Producción</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Presión en cabeza de la tubería (Psi)</li> <li>• Temperatura de fondo de pozo (°F)</li> <li>• Presión estática en el fondo del pozo (Psi)</li> <li>• %BWS</li> <li>• Presión de fondo fluyente (Psi)</li> <li>• Datum de referencia (ft)</li> <li>• Índice de productividad (bpd/psi)</li> <li>• GOR (scf/stb)</li> </ul>
<b>Fluido</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Índice de productividad (bpd/psi)</li> <li>• Factor de compresibilidad Z</li> <li>• Gravedad específica del agua asociada</li> <li>• Gravedad API del crudo</li> <li>• Gravedad específica del gas asociado</li> <li>• Presión de burbuja (Psi)</li> </ul>

## 3.2. ECUACIONES PARA EL DISEÑO DEL SISTEMA BES

Las siguientes expresiones fueron tomadas de Baker Hughes, en su publicación: Nueve pasos para el diseño de un sistema de levantamiento artificial por bombeo electrosumergible.

### 3.2.1. Relación de gas aceite en solución (Rs)

La determinación de la relación gas-petróleo en solución se encuentra dada por la siguiente ecuación:

$$R_s = SG_g \left( \frac{P_b}{18} \times \frac{10^{0,0125 \times API}}{10^{0,00091 \times T}} \right)^{1,2048} \quad (1)$$

Dónde,

SGg: Gravedad específica del gas

Pb: Presión de Burbuja en psi

T: Temperatura de fondo del Pozo °F

a) Factor volumétrico de formación del aceite (Bo). El factor volumétrico de formación del aceite está dado por la ecuación siguiente:

$$B_o = 0,972 + 0,00147 \times F^{1,175} \quad (2)$$

De la cual:

$$F = R_s \times \left( \frac{SG_g}{SG_o} \right)^{0,5} + 1,25 \times T \quad (3)$$

Dónde:

SGg = Gravedad específica del gas

SGo = Gravedad específica del petróleo

T = Temperatura de fondo del pozo en °F

b) Factor volumétrico del gas (Bg). El factor volumétrico del gas, se encuentra determinado a través de la siguiente ecuación:

$$B_g = 5,04 \times \left( \frac{Z \cdot T}{P} \right) \quad (4)$$

Dónde:

Z = Factor de compresibilidad del gas (0,81 a 0,91)

T = Temperatura de fondo del pozo en °R (°R=460+°F)

P = Presión de sumergencia en psi

### 3.2.2. Volumen Total de Fluido

Después de determinar los tres valores de  $R_s$ ,  $B_o$  y  $B_g$ , si se conoce el GOR, las cantidades de petróleo crudo, agua y gas libre se pueden estimar y calcular a partir de datos de producción utilizando las siguientes ecuaciones:

$$Gas\ Total = \left( \frac{GOR\ producción \times BOPD}{1000} \right) \times MCF \quad (5)$$

El gas en solución a la profundidad de asentamiento puede ser determinada mediante la expresión dada por la siguiente ecuación:

$$Gas\ en\ Solución = \left( \frac{R_s \times BOPD}{1000} \right) \times MCF \quad (6)$$

El gas libre que circula a través de la entrada a la bomba, se calcula como muestra la ecuación:

$$Gas\ Libre = (Gas\ Total - Gas\ en\ solución) \times MCF \quad (7)$$

Para el cálculo del volumen de petróleo ( $V_o$ ), de agua ( $V_g$ ) y de gas ( $V_w$ ) a la profundidad de asentamiento de la bomba se utilizan las ecuaciones:

$$V_o = (BOPD \times B_o) \times BOPD \quad (8)$$

$$V_g = (Gas\ libre \times B_g) \times BOPD \quad (9)$$

$$V_w = (BOPD \times B_w) \times BOPD \quad (10)$$

Con esto, se puede determinar que el volumen total de fluido a manejar por la bomba será determinado como muestra la ecuación:

$$V_t = (V_o + V_g + V_w) \quad (11)$$

Al diseñar un sistema de bombeo eléctrico sumergible, se recomienda que el porcentaje de gas libre que circula por la bomba no supere el 10%, ya que puede ser provocado un problema de cavitación al circular un porcentaje mayor a este, entre otras cosas. Este porcentaje se puede determinar de la siguiente manera:

$$Gas\ Libre\% = \left( \frac{Gas\ Libre}{vt} \right) \times 100\% \quad (12)$$

### 3.2.2. Presión de entrada a la bomba

Al operar bombas sumergibles, es extremadamente importante determinar el nivel de líquido por encima de la bomba o la presión en la entrada de la bomba al pozo. Para ello, es importante conocer la gravedad específica o gradiente de fluido en el espacio anular, el cual viene determinado por la ecuación:

$$PIP = (P_{wf}) - \left( \frac{(Cabeza\ Pies) \times (Gravedad\ Especifica\ Fluido)}{2,31\ pies/PSI} \right) \quad (13)$$

Donde:

Se considera cabeza a la diferencia que existe entre la profundidad del punto medio de perforaciones (PMP) y la profundidad de asentamiento de la bomba.

$P_{wf}$  es la nueva presión de flujo  $P_{wf}$  a la tasa deseada  $Q_d$ , dada por la ecuación:

$$P_{wf} = P_r - \left( \frac{Q_d}{IP} \right) \quad (14)$$

### 3.2.3. Cálculo del cabezal dinámico total en pies (TDH).

El Cabezal Dinámico Total (TDH) corresponde al trabajo que debe desarrollar la bomba para que el líquido llegue hasta la superficie, y está determinada por la siguiente ecuación:

$$TDH = (LNV + Pf + THP) \quad (15)$$

De la cual el Levantamiento Neto Vertical (LNV) se considera como la altura en pies requerida para elevar la bomba desde el nivel de fluido dinámico, y viene dada por la ecuación:

$$LNV = \text{profundidad de la bomba pies} - \left( \frac{PIP \text{ psi} \times 2,31 \text{ pies/psi}}{\gamma_{liq}} \right) \quad (16)$$

THP se considera a la cabeza que se requiere para que el fluido ingrese en el sistema de superficie y logre llegar hasta el punto de estación de recolección o batería. Está definido por la ecuación:

$$THP = (THP \text{ psi} \times 2,31 \text{ pies/psi}) \quad (17)$$

### 3.2.4. Selección del Tipo de Bomba

Utilizando la altura dinámica total calculada en pies y el flujo de diseño deseado, se utilizan catálogos de proveedores y se revisan las hojas de datos para la selección de la bomba. Luego, revise las métricas de rendimiento de la etapa de la bomba y seleccione el tipo de bomba que sea más eficiente para crear flujo dentro del rango de bombas que pueden hacer el trabajo.

Determinación del Tamaño Óptimo de Bomba. Utilizando las curvas de rendimiento de la bomba que se presentan en los catálogos de los fabricantes, es necesario seleccionar el tipo de bomba de modo que el diámetro de la bomba se ajuste al revestimiento del pozo y el caudal deseado se establezca dentro del rango de rendimiento recomendado. Además, es necesario determinar la altura producida y la potencia requerida para cada etapa a la frecuencia máxima de operación.

El número de etapas necesarias para la carga dinámica completa se determina mediante la siguiente ecuación, las dimensiones óptimas del motor y del sello, y la consideración de las limitaciones del equipo.

$$Total \text{ Etapas} = \frac{TDH}{Cabeza \text{ por etapas}} \quad (18)$$

La siguiente ecuación se utiliza para calcular la potencia requerida para la bomba seleccionada, en la que la potencia para cada etapa de la bomba seleccionada se toma de las curvas de potencia para cada etapa que se requiere:

$$HP = (Etapas \text{ Totales}) \times (HP \text{ por etapa}) \quad (19)$$

Se requiere especial cuidado al elegir un protector o sello del sistema. Se recomienda al operador utilizar la tabla de aplicaciones de configuración de fusibles como una guía o referencia.

# CAPITULO IV: ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

## 4.1. Parámetros

El estudio se centró en la elaboración de un software como aplicación informática, su ejecución se desarrolló en MatLab y en su diseño se agregó tablas de distintos parámetros PVT que posee el yacimiento, así como tablas, curvas y matrices para los cálculos requeridos, una vez finalizada la aplicación se procedió a realizar un estudio verificativo de los resultados obtenidos del programa comparándolos con otras tesis de diferentes pozos. Para ello, se ingresa en la interfaz las variables que determinarán posteriormente los 28 parámetros del diseño.

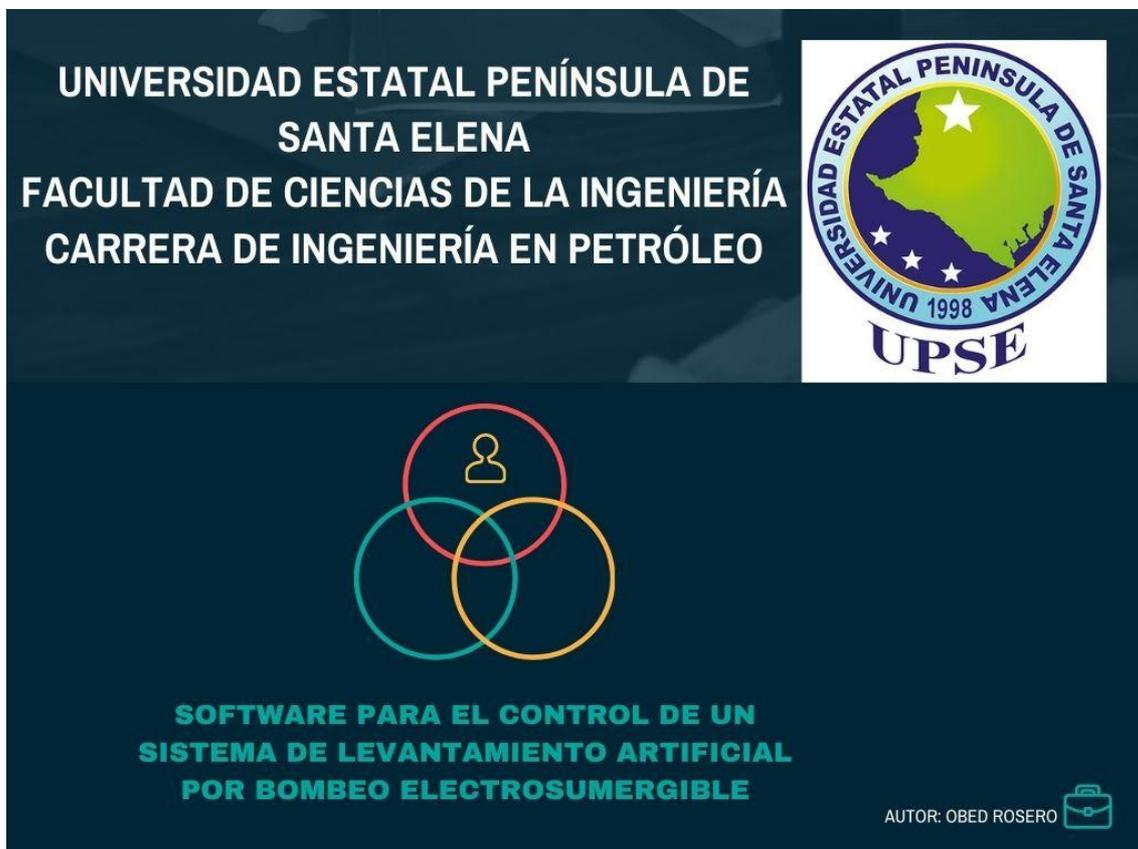
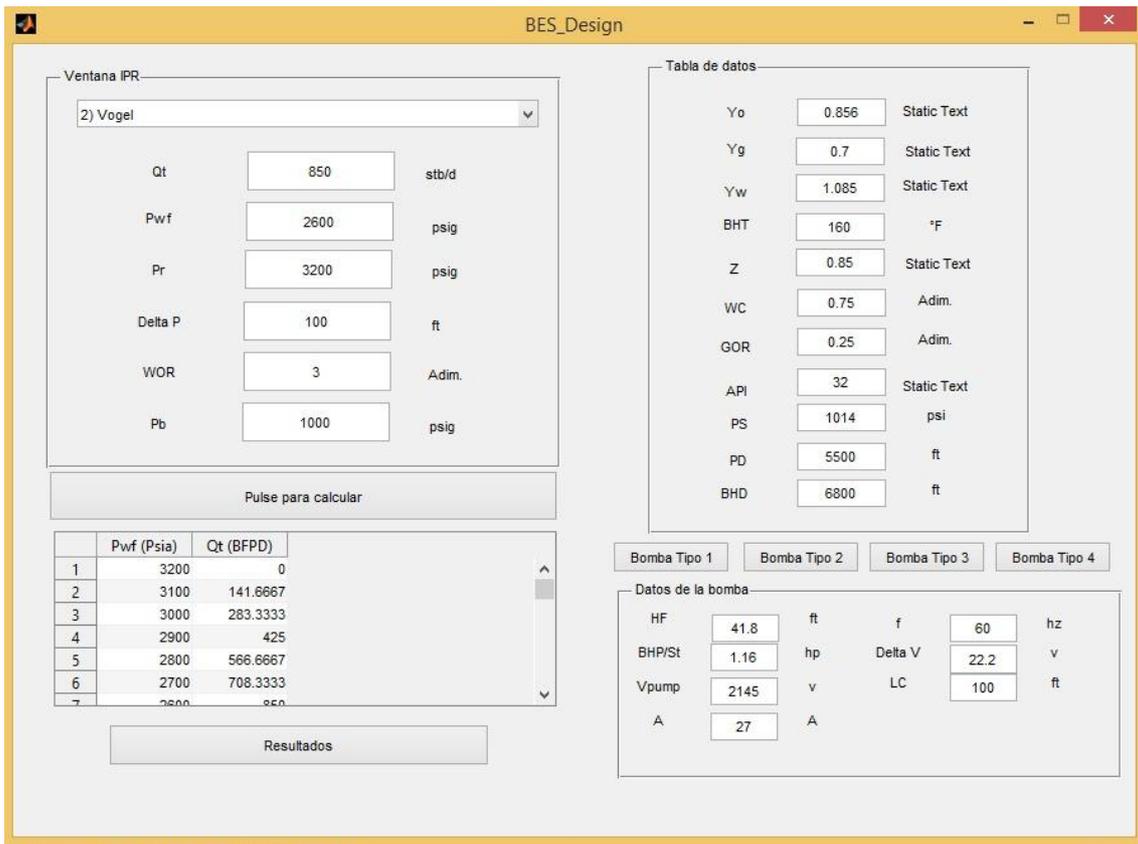
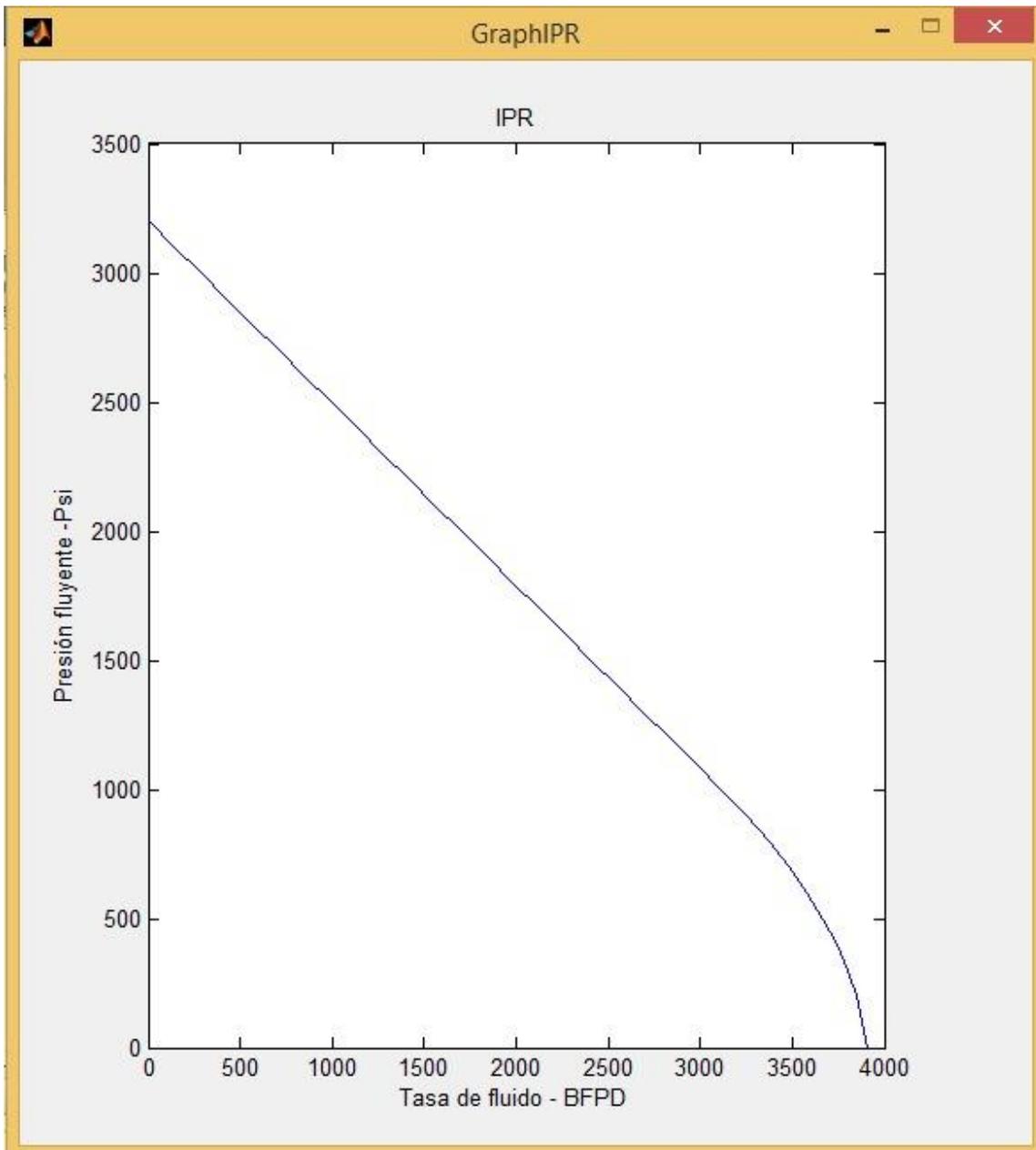


Figura 8. Interfaz de bienvenida



**Figura 9. Interfaz de panel de datos**



**Figura 10. Gráfica de la Curva IP**



**Figura 11. Interfaz de resultados**

#### **4.2. Proceso de identificación de ecuaciones o parámetros**

Para identificar las ecuaciones o parámetros para la determinación de las variables para el desarrollo del software se usó MATLAB una plataforma de programación diseñada específicamente para analizar y diseñar sistemas y productos que transforman el mundo. El centro de MATLAB es el lenguaje MATLAB, un lenguaje basado en matrices que permite la expresión más natural de las matemáticas computacionales, de esta forma aporta al análisis de los datos, desarrollo de algoritmos y creación de modelos y aplicaciones. (Campos, 2017)

En este sentido, se utilizó la plataforma de MATLAB para generar un software para determinación de parámetros en un sistema de levantamiento artificial por bombeo electrosumergible, que consiste en desarrollar el algoritmo para la automatización de cálculos, mediante el uso de códigos de programación que permitió ejecutar las ecuaciones.

#### **4.3. Desarrollar el programa para la automatización de cálculos**

En cuanto al desarrollo del programa para la automatización de cálculos, se aplicó mediante el ingreso de códigos de programación de las ecuaciones a ejecutar, se utilizó los métodos Voguel y Standing, bajo los siguientes procesos:

En cuanto a las líneas de código la cuales son:

- “VarQT” son los datos de las variables a ingresar en el software para determinación de parámetros en un sistema de levantamiento artificial por bombeo electro sumergible.
- “Switch” código el cual significa que hay dos opciones, para calcular dos caudales, cada uno de distinto autor (*case 1; case 2*), por el método de Vogel y Standing.
- “If” es una condición, en caso de que no se cumpla la condición planteada, se da paso al
- “Else” va a cumplir
- “Dat Pwf” son los resultados de las fórmulas ingresadas
- “End” es fin

```
% --- Executes on button press in Launcher.
function Launcher_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject      handle to Launcher (see GCBO)
% eventdata    reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles      structure with handles and user data (see GUIDATA)
global DatPwf
global DatQt
VarQT=str2double(get(handles.VarQT, 'String'));
VarPwf=str2double(get(handles.VarPwf, 'String'));
VarPyac=str2double(get(handles.VarPyac, 'String'));
VarDP=str2double(get(handles.VarDP, 'String'));
VarWOR=str2double(get(handles.VarWOR, 'String'));
VarPb=str2double(get(handles.VarPb, 'String'));
alternativaIPR=get(handles.alternativaIPR, 'Value');
switch alternativaIPR
    case 1
        if VarWOR==0
            VarQiP=VarQT;
        else
            VarQiP=(VarQT/VarWOR)/(1+(1/VarWOR));
        end
        DatPwf=[];
        n=1;
        DatPwf(n)=VarPyac;
        while DatPwf(n)>0
            n=n+1;
        end
    end
end
```

Es así que se expone el caso 1, el cual se trabajó por el método de Vogel, usado para encontrar una primera solución factible al caudal, donde el procedimiento comienza con otra fórmula.

```

        DatPwf(n)=DatPwf(n-1)-(VarDP);
        if DatPwf(n)<0
            DatPwf(n)=0;
        end
    end
end
DatQo=[];
DatQw=[];
DatQt=[];
TotalPwf=length(DatPwf);
DatQtmax=VarQT/(1-0.2*(VarPwf/VarPyac)-0.8*(VarPwf/VarPyac)^2);
for i=1:TotalPwf
    DatQo(i)=DatQtmax*(1-0.2*(DatPwf(i)/VarPyac)-0.8*(DatPwf(i)/VarPyac)^2);
    DatQw(i)=(DatQo(i)*VarWOR);
    DatQt(i)=DatQo(i)+DatQw(i);
end
case 2
if VarWOR==0
    VarQiP=VarQT;
else
    VarQiP=(VarQT/VarWOR)/(1+(1/VarWOR));
end
DatPwf=[];
n=1;
DatPwf(n)=VarPyac;

```

**Figura 13. Códigos de IP por método de Vogel y Standing**

Se da paso, al segundo caso

```

while DatPwf(n)>0
    n=n+1;
    DatPwf(n)=DatPwf(n-1)-(VarDP);
    if DatPwf(n)<0
        DatPwf(n)=0;
    end
end
TotalPwf=length(DatPwf);
if VarPyac>=VarPb
    if VarPwf>=VarPb
        DatIP=VarQiP/(VarPyac-VarPwf);
    else
        DatIP=VarQiP/((VarPyac-VarPb)+(VarPb/1.8)*(1-0.2*(VarPwf/VarPb)-0.8*(VarPwf/VarPb)^2));
    end
    VarQob=DatIP*(VarPyac-VarPb);
    DatQomax=VarQob+(DatIP*(VarPb/1.8));
    DatQwmax=DatQomax*VarWOR;
    DatQtmax=DatQomax+DatQwmax;
    DatQo=[];
    DatQw=[];
    DatQt=[];
    for i=1:TotalPwf
        if DatPwf(i)>=VarPb
            DatQo(i)=DatIP*(VarPyac-DatPwf(i));

```

**Figura 14. Línea de códigos de las fórmulas de índices de productividad**

```

        DatQw(i)=(DatQo(i)*VarWOR);
        DatQt(i)=DatQo(i)+DatQw(i);
    else
        DatQo(i)=VarQob+((DatIP*VarPb)/1.8)*(1-0.2*(DatPwf(i)/VarPb)-0.8*(DatPwf(i)/VarPb)^2);
        DatQw(i)=(DatQo(i)*VarWOR);
        DatQt(i)=DatQo(i)+DatQw(i);
    end
end
else
    DatQomax=VarQiP/(1-0.2*(Pwfipin/VarPyac)-0.8*(Pwfipin/VarPyac)^2);
    DatQwmax=DatQomax*VarWOR;
    DatQtmax=DatQomax+DatQwmax;
    DatQo=[];
    DatQw=[];
    DatQt=[];
    for i=1:TotalPwf
        DatQo(i)=DatQomax*(1-0.2*(DatPwf(i)/VarPyac)-0.8*(DatPwf(i)/VarPyac)^2);
        DatQw(i)=(DatQo(i)*VarWOR);
        DatQt(i)=DatQo(i)+DatQw(i);
        if DatQo(i)<0
            DatQo(i)=0;
        end
    end
end
end
end
end

```

Figura 15. Línea de códigos finales

```

% --- Executes on button press in VarResultados.
function VarResultados_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to VarResultados (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

global DatQtDes
global DatPwfDes
VarQT=str2double(get(handles.VarQT, 'String'));
VarPwf=str2double(get(handles.VarPwf, 'String'));
VarPyac=str2double(get(handles.VarPyac, 'String'));
VarYo=str2double(get(handles.VarYo, 'String'));
VarYg=str2double(get(handles.VarYg, 'String'));
VarYw=str2double(get(handles.VarYw, 'String'));
VarBHT=str2double(get(handles.VarBHT, 'String'));
VarZ=str2double(get(handles.VarZ, 'String'));
VarWC=str2double(get(handles.VarWC, 'String'));
VarGOR=str2double(get(handles.VarGOR, 'String'));
VarAPI=str2double(get(handles.VarAPI, 'String'));
VarPb=str2double(get(handles.VarPb, 'String'));
VarPS=str2double(get(handles.VarPS, 'String'));
VarPD=str2double(get(handles.VarPD, 'String'));
VarBHD=str2double(get(handles.VarBHD, 'String'));
VarHF=str2double(get(handles.VarHF, 'String'));
Varf=str2double(get(handles.Varf, 'String'));

```

Figura 16. Fórmulas principales del diseño BES

“DatQtDes” y “DatPwfDes” son valores que se encuentran guardados en la ventana que procede de la gráfica IPR, sitio de almacenamiento de las variables, continua después de la declaración de variables.

```
VarBHPSt=str2double (get (handles.VarBHPSt, 'String' ));  
VarDeltaV=str2double (get (handles.VarDeltaV, 'String' ));  
VarVpump=str2double (get (handles.VarVpump, 'String' ));  
VarLC=str2double (get (handles.VarLC, 'String' ));  
VarA=str2double (get (handles.VarA, 'String' ));  
DatQtDes  
DatPwfDes  
global DatIP  
global DatPwf  
global DatCYWO  
global DatPDP  
global DatPIP  
global DatRs  
global DatBg  
global DatF  
global DatBo  
global DatGT  
global DatGS  
global DatFG  
global DatVo  
global DatVg  
global DatVw  
global DatVt  
global DatPLG
```

**Figura 17. Código de ingreso de las variables fijadas por la función global**

Asimismo, en el código de global acompañado de “DatTMHPF” son las variables de resultados que se utiliza después en otra ventana donde suelen estar los resultados, es por esto que se continúa usando “global” para almacenar los valores y continuar usando en la ventana de resultados, en este caso al dirigirse a la ventana de resultados se constata el código “global”.

```

global DatTMPF
global DatCompY
global DatHd
global DatFt
global DatPd
global DatIDH
global DatNS
global DatBHP
global DatSV
global DatKVA
DatWO=1-VarWC;
DatIP=(VarQT/(VarPyac-VarPwf))
DatPwf=(VarPyac-(DatQtDes/DatIP))
DatPWC=(VarWC*VarYw);
DatPOC=(DatWO*VarYo);
DatCYWO=(DatPWC+DatPOC)
DatDiP=(VarBHD-VarPD);
DatPDF=((DatDiP*DatCYWO)/2.31)
DatPIP=(DatPwf-DatPDF)
DatRs=VarYg*((VarPb/18)*((10^(0.0125*VarAPI))/(10^(0.00091*VarBHT))))^1.2048)
DatBg=5.04*(VarZ*(VarBHT+460)/VarPS)
DatF=DatRs*((VarYg/VarYo)^0.5)+1.25*VarBHT
DatBo=0.972+(0.000147*(DatF^1.175))
DatGT=((VarGOR*(DatQtDes*(DatWO)))/1000)

```

**Figura 18. Línea de códigos de las ecuaciones del diseño BES**

Programación de las fórmulas, donde se finaliza con el código ‘run’ que va enviar a abrir o ejecutar la ventana de resultados.

```

DatGS=((DatRs*(DatQtDes*DatWO))/1000)
DatFG=(DatGT-DatGS)
DatVo=((DatQtDes*DatWO)*DatBo)
DatVg=(DatFG*DatBg)
DatVw=(DatQtDes*VarWC)
DatVt=(DatVo+DatVg+DatVw)
DatPLG=((DatVg/DatVt)*100)
DatTMPF=((DatQtDes*DatWO*VarYo)+(DatVw*VarYw))*(62.4*5.6146)+(VarGOR*(DatQtDes*DatWO)*VarYg*0.0752)
DatCompY=(DatTMPF/(DatVt*5.6146*62.4))
DatHd=(VarPD-((DatPIP*2.31)/DatCompY))
DatFt=((VarPD*49)/1000)
DatPd=((100*2.31)/DatCompY)
DatIDH=(DatHd+DatFt+DatPd)
DatNS=(DatIDH/VarHF)
DatBHP=(VarBHPst*DatNS*DatCompY)
DatSV=(VarVpump+(VarDeltaV*(VarPD+VarLC)/1000))
DatKVA=(DatSV*(VarA*1.73)/1000)
run('Resultados_BES_Design')

function VarWO_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject handle to VarWO (see GCBO)

```

**Figura 19. Línea de códigos finales de las ecuaciones**

```

% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of VarWO as text
% str2double(get(hObject,'String')) returns contents of VarWO as a double

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function VarWO_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject handle to VarWO (see GCBO)
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles empty - handles not created until after all CreateFcns called

% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
% See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'), get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

function edit24_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject handle to edit24 (see GCBO)
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB

```

**Figura 20. Código de nombramiento de las variables a utilizar**

# **CAPITULO V: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

## **5.1 CONCLUSIONES**

En el presente trabajo se logró realizar un software que posee un margen de error menor al 1%, lo cual se había planteado desde el inicio del proyecto en los que se detalla parámetros de: producción, físicos, petrofísicos y eléctricos, todo esto con el fin de llevar un control del sistema de bombeo electrosumergible mientras se encuentra en operación.

El software que se desarrolló es de fácil operatividad y presenta una interfaz amigable con el usuario cumpliendo así el objetivo planteado utilizando además información confiable de empresas como Baker Hughes para su validación, esta información técnica es completa y presenta varias opciones para selección de bombas para el desarrollo del cálculo lo que convierte en un software distinto a los propuestos anteriormente.

El software que se ha desarrollado puede llegar a brindar una utilidad de control del diseño de manera específica de los parámetros en un sistema de bombeo electrosumergible en tiempo real, el cual puede ser ocupado como prototipo para el desarrollo de nuevos programas en el área de levantamiento artificial y producción.

El software ha sido elaborado con el propósito de calcular todos los parámetros que influyen en el control de un sistema de levantamiento artificial por bombeo electrosumergible, bajo los métodos de Standing y Vogel para el cálculo de índice de productividad, consecuentemente pasando a calcular desde parámetros físicos, petrofísicos, productivos y eléctricos los cuales nos permiten realizar una selección adecuada de componentes bajo el subsuelo, así como mantener una regulación y control de la energía usada durante la operación, manteniendo una mayor vida útil en los equipos eléctricos.

## **5.2 RECOMENDACIONES**

Conforme a la información que se recaba se recomienda, en primer lugar hacer amplio análisis sobre el desempeño del software en específico al ámbito en el que se va a aplicar en este caso en el sector de producción del campo petrolero, se debe además capacitar a las personas que van a utilizar el software de una de una forma básica y clara sobre el uso de este para que puedan optimizar y utilizar de mejor manera el software.

Es necesario que el operador al utilizar el software primero analice todas las variables de manera completa, tanto las del subsuelo como de superficie, además recabar toda la información necesaria previamente de los equipos, especialmente de la bomba centrífuga antes de usar el software para poder optimizar aún más los tiempos de operación.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abarca, A., & Nuñez, P. (2015). *Producción de hidrocarburos I*. Maracaibo: Instituto Universitario Politécnico “Santiago Mariño”.
- Adell, J., & y Bernabé, Y. (2007). *Software libre en educación. Tecnología educativa*. Madrid: McGraw-Hill.
- Baby, P., Rivadeneira, M., & Barragán, R. (2004). *LA CUENCA ORIENTE: GEOLOGÍA Y PETRÓLEO*. Lima: Institut français d'études andines, Institut de Recherche pour le Développement (IRD), Petroecuador.
- Candelaria, M. B. (2011). *Aplicación de modelos de simulación en el estudio y planificación de la agricultura, una revisión*.
- Candelaria, M. B., Ruiz, R. O., Gallardo, L. F., Pérez, H. P., Martínez, B. Á., & y Vargas, V. L. (2011). *Aplicación de modelos de simulación en el estudio y planificación de la agricultura, una revisión*. Mérida: Tropical and subtropical agroecosystems.
- Fajardo, T. C., & Riola, J. M. (2021). La digitalización y la industria 4.0, factores fundamentales para una propuesta de valor en el sector defensa. *Revista Ibérica de Sistemas e Tecnologías de Informação, (E43), XI-XIII*.
- Gualdrón, O., & Reales, J. (2015). IMPLEMENTACIÓN DE UNA ESTRATEGIA DE CONTROL DIFUSO PARA AUMENTAR LA PRODUCCIÓN DE CRUDO EN POZO PETROLERO. *Revista Colombiana de Tecnologías de Avanzada*, 98-103.
- Gutiérrez, N., & Rojas, V. (2018). *DESARROLLO DE UN SOFTWARE PARA EL CÁLCULO DEL NIVEL DINÁMICO DE FLUIDO DE UN POZO MEDIANTE LOS DATOS DE TORQUE DE VARILLA EN UN SISTEMA DE LEVANTAMIENTO ARTIFICIAL POR BOMBEO DE CAVIDADES PROGRESIVAS PCP*. Bogota: FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA.
- Jutglar, L., & Galán, M. (2012). *Termotecnia*. Barcelona: Marcombo.
- Lanfranchi, E. (2016). *Flujo Multifásico I: Introducción*. Berlin: XinXii.

- Merino, L. (2019). *Mejoras en cementación primaria de pozos con problemas de invasión y/o impulsión de agua*. Piura: Universidad Nacional de Piura.
- Mott, R. (2006). *Mecánica de Fluidos 6/e*. México D.F: Pearson Educación.
- NOVOMET. (05 de 01 de 2022). *Motores de BES*. Obtenido de <https://es.novometgroup.com/products-services/artificial-lift/esp-motors/>
- Peñañiel, J. (2015). *Optimización del bombeo electrosumergible en la producción de petróleo: Área Shushufindi - Ecuador*. Quito: EAE.
- Pérez, P. (2001). *Transformadores de distribución*. México D.F: Reverté.
- Salgado, J., Bernal, R., Zambrano, A., Romero, F., Franco, L., & Pérez, C. (2011). *Identificación de Cartas Dinagráficas de Fondo mediante el uso de Redes Neuronales como herramienta de Ayuda en el Bombeo Mecánico*. Bogota: Revista Ingeniería y Región.
- Vargas, E. (2021). *Método de levantamiento artificial por bombeo electrosumergible (BES)*.

