

**METODOLOGÍA PARA LA ESPECIFICACIÓN DEL MOTOR
EMPLEADO EN EL SISTEMA DE BOMBEO
ELECTROSUMERGIBLE DE CRUDO**

Nora Yoselly Malavera Castro

Russdel Ramírez Trujillo

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO - MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y
DE TELECOMUNICACIONES
BUCARAMANGA
2011**

**METODOLOGÍA PARA LA ESPECIFICACIÓN DEL MOTOR
EMPLEADO EN EL SISTEMA DE BOMBEO
ELECTROSUMERGIBLE DE CRUDO**

Nora Yoselly Malavera Castro

Russdel Ramírez Trujillo

Tesis de grado para optar al título de Ingeniero Electricista

Director

HERMANN RAÚL VARGAS TORRES

Doctor Ingeniero Electricista

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO - MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y
DE TELECOMUNICACIONES**

BUCARAMANGA

2011

Dedicatorias y agradecimientos

Son muchas las personas especiales a las que me gustaría agradecer, por su amistad, su apoyo, ánimo y compañía en las diferentes etapas de mi vida. Algunas están aquí conmigo y otras en mis recuerdos y en el corazón. Sin importar en dónde estén o si alguna vez llegan a leer estas dedicatorias quiero darles las gracias por formar parte de mí, por todo lo que me han brindado y por todas sus bendiciones.

A Dios.

Por haberme permitido llegar hasta este punto y haberme dado salud para lograr mis objetivos, además de su infinita bondad y amor.

A mi madre.

Por haberme apoyado en todo momento, por sus consejos, sus valores, por la motivación constante que me ha permitido ser una persona de bien, pero más que nada, por su amor.

A mi hermana.

¿Adivina qué? Eres la mejor hermana, gracias.

A mis amigos.

A todos mis amigos, sin excluir a ninguno, pero en especial a Liliana, Cris, María Ceci, Sebas, Anita, Diego Amorocho y Russdel, mil gracias por todos los momentos que hemos pasado juntos y porque han estado conmigo apoyándome en mi formación profesional.

A mis profes.

No sólo de la carrera sino de toda la vida, mil gracias porque de alguna manera forman parte de lo que ahora soy. Especialmente a Hermann Raúl Vargas Torres y Gilberto Carrillo Caicedo.

*A la **Universidad Industrial de Santander** y en especial a la **Escuela de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones.***

¡Gracias!

Nora Yoselly Malavera Castro.

Son muchas las personas especiales a las que me gustaría agradecer, por su amistad, su apoyo, ánimo y compañía en las diferentes etapas de mi vida. Algunas están aquí conmigo y otras en mis recuerdos y en el corazón. Sin importar en dónde estén o si alguna vez llegan a leer estas dedicatorias quiero darles las gracias por formar parte de mí, por todo lo que me han brindado y por todas sus bendiciones.

A Dios.

Por haberme permitido llegar hasta este punto y haberme dado salud para lograr mis objetivos, además de su infinita bondad y amor.

A mis padres, hermanos, madrina y tía.

Por haberme apoyado en todo momento, por sus consejos, sus valores, por la motivación constante que me ha permitido ser una persona de bien, pero más que nada, por su amor.

A mis amigos.

A todos mis amigos, sin excluir a ninguno, pero en especial a Carlos, Isa, Sebas, Anita, Amorocho y Nora, mil gracias por todos los momentos que hemos pasado juntos y porque han estado conmigo apoyándome en mi formación profesional.

A mis profesores.

No sólo de la carrera sino de toda la vida, mil gracias porque de alguna manera forman parte de lo que ahora soy. Especialmente a Hermann Raúl Vargas Torres por su especial colaboración.

A la Universidad Industrial de Santander y en especial a la Escuela de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones.

¡Gracias!

Russdel Ramírez Trujillo.

Índice general

| | |
|---|-----------|
| 1. INTRODUCCIÓN | 25 |
| 1.1. Planteamiento del problema | 25 |
| 1.2. Objetivos | 26 |
| 1.2.1. Objetivo general | 26 |
| 1.2.2. Objetivos específicos | 26 |
| 1.3. Organización de la presentación | 27 |
| | |
| 2. MARCO TEÓRICO | 29 |
| 2.1. El sistema de bombeo electrosumergible (B.E.S) | 29 |
| 2.2. Equipos superficiales | 30 |
| 2.2.1. Transformador reductor (SDT) | 31 |
| 2.2.2. Transformador elevador (SUT) | 31 |
| 2.2.3. Controladores del motor | 31 |
| 2.2.4. Caja de venteo o de conexiones (Vent Box) | 32 |
| 2.2.5. Cabezal del pozo | 33 |
| 2.3. Equipos de subsuelo | 33 |
| 2.3.1. El sello o protector | 34 |
| 2.3.2. Tubería de extracción (Tubing) | 34 |
| 2.3.3. Bomba | 35 |

| | | |
|-----------|--|-----------|
| 2.3.4. | Entrada a la bomba (Intake) | 36 |
| 2.3.5. | El motor eléctrico | 36 |
| 2.3.6. | Cable de potencia. | 37 |
| 2.3.7. | Componentes opcionales | 38 |
| 3. | CONCEPTOS Y ECUACIONES BÁSICAS PARA EL DISEÑO DE UN SISTEMA DE BOMBEO ELECTROSUMERGIBLE | 40 |
| 3.1. | Conceptos básicos para el diseño de sistemas de bombeo electrosumergible | 41 |
| 3.2. | Ecuaciones para el diseño del sistema BES | 44 |
| 3.2.1. | Relación de gas aceite en solución (R_S) | 44 |
| 3.2.2. | Volumen total de fluidos | 45 |
| 3.2.3. | Presión de entrada a la bomba | 47 |
| 3.2.4. | Cálculo de la cabeza dinámica total en pies (TDH). | 47 |
| 3.2.5. | Selección del tipo de bomba | 48 |
| 3.3. | Ecuaciones propuestas para la determinación del equipo eléctrico y criterios de selección del aceite del motor | 49 |
| 3.3.1. | Motor de inducción | 51 |
| 3.3.2. | Aceite del motor | 51 |
| 3.3.3. | Capacidad nominal de aparatos de protección de motores | 53 |
| 3.3.4. | Selección de conductores. | 53 |
| 3.3.5. | Variador | 54 |
| 3.3.6. | Protección del circuito ramal del motor contra cortocircuitos y fallas a tierra. | 55 |
| 3.3.7. | Medios de desconexión del motor. | 55 |
| 3.3.8. | Protección del alimentador del motor contra cortocircuitos y fallas a tierra. | 55 |
| 3.3.9. | Conductor alimentador del sistema. | 55 |

| | |
|--|-----------|
| 4. IMPLEMENTACIÓN DE LA METODOLOGÍA Y RESULTADOS. | 57 |
| 4.1. Interfaz gráfica | 57 |
| 4.1.1. Ingreso de los datos del pozo a evaluar | 58 |
| 4.1.2. Selección bomba y motor | 58 |
| 4.1.3. Selección variador | 59 |
| 4.1.4. Selección cable de alimentación del motor. | 60 |
| 4.1.5. Modelado del motor. | 60 |
| 4.1.6. Modelado del transformador Elevador | 60 |
| 4.1.7. Modelado del transformador Reductor | 62 |
| 4.1.8. Modelado del cable de alimentación del motor. | 63 |
| 4.2. Diseño del sistema de bombeo electrosumergible. | 64 |
| 4.2.1. Recopilación de datos. | 64 |
| 4.2.2. Ejecución de la herramienta software. | 67 |
| | |
| 5. ANÁLISIS Y RESULTADOS | 82 |
| 5.1. Tensiones de superficie | 82 |
| 5.2. Arranque del motor | 82 |
| 5.3. Estado estable | 87 |
| | |
| 6. CONCLUSIONES Y DESARROLLOS FUTUROS | 90 |
| 6.1. Conclusiones | 90 |
| 6.2. Desarrollos futuros | 91 |
| | |
| BIBLIOGRAFÍA | 93 |

| | |
|---|------------|
| A. El ATPDraw | 96 |
| A.1. El motor de inducción en el ATPDraw | 97 |
| A.1.1. Modelo de la máquina de Inducción | 97 |
| A.2. Cable de alimentación | 107 |
| A.2.1. Modelado del cable del motor | 107 |
| A.2.2. Matriz de impedancias del SC cable | 109 |
| A.2.3. Coeficientes de potencial | 111 |
| | |
| B. Figuras | 113 |
| | |
| C. Tablas | 126 |
| | |
| D. Manual del usuario | 137 |
| D.1. Instalación | 137 |
| D.2. Procedimiento de instalación | 138 |
| D.2.1. metodoliagía uno | 138 |
| D.2.2. metodoliagía dos | 138 |
| D.3. Manejo de la herramienta software | 140 |
| D.3.1. Recopilación de datos | 141 |
| D.3.2. Ingreso de los datos de entrada y ejecución de la herra- mienta | 143 |
| D.3.3. Modelado del motor | 153 |
| D.3.4. Modelado transformador Elevador | 154 |
| D.3.5. Modelado transformador Reductor | 155 |
| D.3.6. Modelado cable | 155 |
| D.3.7. Simulación del sistema cable-motor. | 156 |
| D.3.8. Resultados | 159 |
| D.4. Características | 159 |

Índice de figuras

| | |
|---|----|
| 2.1. Configuración básica de un sistema B.E.S. | 30 |
| 2.2. Configuración de cables de potencia | 37 |
| 3.1. Diagrama Sistema Eléctrico | 50 |
| 3.2. Diagrama para la selección del aceite del motor | 52 |
| 3.3. Caída de tensión en el cable respecto de la corriente por cada 1000 pies de cable | 54 |
| 4.1. Pestaña de Bombeo | 58 |
| 4.2. Ventana selección bomba | 59 |
| 4.3. Pestaña selección variador. | 60 |
| 4.4. Pestaña para el cálculo de los parámetros del motor de inducción. | 61 |
| 4.5. Pestaña para el cálculo de los parámetros del transformador. | 62 |
| 4.6. Pestaña para el cálculo de los parámetros transformador reductor. | 63 |
| 4.7. Pestaña para la determinación del cable de alimentación del motor. | 64 |
| 4.8. Diagrama conceptual del funcionamiento de la herramienta soft- ware | 66 |
| 4.9. Ventana Selección Bomba | 74 |
| 4.10. Pestaña Bombeo esperando los datos necesarios para la determi- nación del variador | 76 |
| 4.11. Pestaña selección variador. | 80 |

| | |
|---|-----|
| 5.1. Tensión de fase del variador a 60Hz. | 83 |
| 5.2. Tensión de fase del variador a 40Hz. | 83 |
| 5.3. Tensión de fase del variador a 20Hz. | 83 |
| 5.4. Tensión de línea del variador a 60Hz | 84 |
| 5.5. Tensión de línea del variador a 40Hz | 84 |
| 5.6. Tensión de línea del variador a 20Hz | 84 |
| 5.7. Corriente de entrada del motor a 60Hz. | 85 |
| 5.8. Corriente de entrada del motor a 40Hz. | 85 |
| 5.9. Corriente de entrada del motor a 20Hz. | 85 |
| 5.10. Tensión en bornes del motor a 60Hz | 86 |
| 5.11. Tensión en bornes del motor a 40Hz | 86 |
| 5.12. Tensión en bornes del motor a 20Hz | 87 |
| 5.13. tensiones de fase en estado estable. | 88 |
| 5.14. tensiones de fase en estado estable. | 89 |
| | |
| A.1. Modelo del motor de inducción en el ATPDraw | 98 |
| A.2. Circuitos del estator y el rotor de una máquina de inducción | 98 |
| A.3. Circuito del motor de inducción en estado estable | 106 |
| A.4. Cable de alta tensión | 108 |
| | |
| B.1. Carta de pérdidas por fricción | 113 |
| B.2. Comportamiento de la etapa de una bomba | 114 |
| B.3. Límite de potencia del eje de la bomba | 115 |
| B.4. Velocidad del fluido pasando por el motor | 116 |
| B.5. Caída de tensión en los cables por cada 1000 pies de longitud . . . | 117 |
| B.6. Temperatura de operación del conductor N° 2 | 118 |

| | |
|---|-----|
| B.7. Temperatura de operación del conductor N° 6 | 119 |
| B.8. Viscosidad del aceite muerto | 120 |
| B.9. Gas en solución A.P.I.P. | 121 |
| B.10. Viscosidad del aceite vivo | 122 |
| B.11. Conversión de unidades Cp - S.S.U. | 123 |
| B.12. Efecto de la emulsión sobre la viscosidad del aceite | 124 |
| B.13. Requerimiento de potencia de la sección sellante. | 125 |
| | |
| D.1. ATP Launcher | 140 |
| D.2. Pestaña Bombeo con los datos recopilados del pozo | 142 |
| D.3. Ventana Selección Bomba | 144 |
| D.4. Ventana Selección Bomba | 147 |
| D.5. Pestaña Bombeo esperando la determinación del calibre del cable de alimentación del motor | 148 |
| D.6. Pestaña selección variador. | 150 |
| D.7. Pestaña Bombeo con todos sus cálculos y respuestas realizadas. | 151 |
| D.8. Pestaña Motor | 152 |
| D.9. Pestaña Transformador Elevador | 154 |
| D.10. Pestaña Transformador Reductor | 155 |
| D.11. Pestaña Cable | 156 |
| D.12. Pestaña Simulación | 157 |
| D.13. Ventana de visualización de resultados | 160 |
| D.14. Sistema eléctrico representado en ATPDraw | 165 |

Índice de cuadros

| | |
|---|-----|
| 2.1. Especificaciones de la tubería de producción de petróleo | 35 |
| 4.1. Bombas seleccionadas por la herramienta software que pueden ser implementadas para el sistema. | 67 |
| 4.2. Motores determinados por la herramienta software que cumplen el requerimiento de potencia | 72 |
| C.1. Especificaciones bomba serie 513 | 126 |
| C.2. Especificaciones motores serie 544 | 127 |
| C.3. Especificaciones motores serie 544 | 128 |
| C.4. Rangos-transformadores monofásicos | 129 |
| C.5. límite de presión de la carcasa | 130 |
| C.6. Combinaciones de equipo en diferentes casings | 131 |
| C.7. Especificaciones- variador del motor | 132 |
| C.8. Especificaciones- variadores | 133 |
| C.9. Datos de selección de bombas | 134 |
| C.10. Nomenclatura del cable | 135 |
| C.11. Capacidad de corriente permisible en conductores aislados para 0 a 2 000 V nominales y 60 °C a 90 °C. No más de tres conductores portadores de corriente en una canalización, cable o tierra (directamente enterrados) y temperatura ambiente de 30 °C. . . . | 136 |

Lista de anexos

| | |
|--|-----|
| Anexo A. El ATPDraw | 96 |
| Anexo B. Figuras | 113 |
| Anexo C. Tablas | 126 |
| Anexo D. Manual del Usuario | 137 |

Nomenclatura

Anular: También llamado anular del casing o anillo. Es un pequeño espacio comprendido entre las paredes internas del casing y el equipo de subsuelo del pozo.

Cabeza: Es la cantidad de energía por libra pie de fluido y comúnmente se utiliza para representar la altura vertical de una columna estática de líquido, que corresponde a la presión de un fluido en un punto en cuestión. También se puede considerar como la cantidad de trabajo necesaria para mover un líquido desde su posición original hasta la posición de entrega. Esto incluye el trabajo extra necesario para vencer la resistencia al flujo por parte de la tubería [1].

Cabezal: Conjunto de elementos, válvulas y accesorios implementados para el control del pozo. Existe el cabezal de boca de pozo ubicado en la superficie y el cabezal de fondo de pozo ubicado en el fondo del pozo mismo.

Casing: Revestimiento de concreto que cubre las paredes internas del hueco perforado para la extracción del crudo del interior del pozo.

Couplings: Conectores encargados de unir el motor eléctrico con la bomba. Se instalan en los ejes del motor y la bomba.

Drawdown: Es la diferencia entre la presión de producción de fondo de pozo y la presión estática del pozo P_s . Esta influye en el desempeño del pozo, ya que una gran diferencia de presión, indica la permeabilidad que tiene la formación, ya que esta es inversamente proporcional a la diferencia de presión [7].

Encamisado: Término empleado para hacer referencia al dispositivo acoplado al motor con el fin de disipar el calor generado por éste.

Frecuencia: Número de períodos por segundo de una onda. Se mide en Hertz (Hz) o ciclos por segundo.

Gradiente: Es la presión ejercida por un fluido por cada pie de altura de fluido.

Línea: Término que hace referencia a las líneas eléctricas. Que son un sistema de conductores y sus accesorios, destinados y diseñados para el transporte de energía eléctrica.

Media tensión: Término aplicado para valores de tensión eficaz comprendida mayores a 1 kV y menores a 57,5 kV [15, 17].

Nominal: Término aplicado a una característica de operación. Indica los límites de diseño de esa característica para los cuales presenta las mejores condiciones de operación. Los límites siempre se asocian a una norma técnica [16].

Nominales: De nominal.

Radio de drenaje: Es la distancia comprendida desde el centro del pozo y el límite de volumen de roca permeable al cual se le interrumpe la presión estática. Se le llama radio de drenaje, ya que en la mayoría de los casos se asume un flujo radial desde el reservorio hacia el pozo [7].

Tensión: Diferencia de potencial eléctrico entre dos elementos. En circuitos eléctricos, es el valor eficaz (raíz-media-cuadrática) de la diferencia de potencial entre dos conductores cualesquiera del circuito [14]. Su unidad de medida es el Volt (V).

Tubing: Nombre técnico dado a la tubería de extracción por la cual sube el crudo desde el fondo del pozo hasta la superficie. Está constituido por secciones, tramos de tubo o tubos, que usualmente se utilizan como medida de referencia para la ubicación de dispositivos.

- A: Abreviatura de Amperes. El Ampere, es la unidad de intensidad de corriente eléctrica.
- ATP: Alternative Transient Program. Programa que permite simular los diversos transitorios electromagnéticos que se pueden presentar dentro de los sistemas eléctricos.
- B.E.S: Sistema de Bombeo Electrosumergible de Crudo
- BEP: Punto de mayor eficiencia de la bomba, dado en barriles por día.
- BGPD: Barriles de gas por día
- BHT: Temperatura de fondo de pozo.
- BOPD: Barriles de petróleo por día
-
- BWPD: Barriles de agua por día
- Bg: Factor volumétrico del gas
- Bo: Factor volumétrico de formación del aceite
- GOR: Es la relación o proporción gas-aceite que presenta el fluido a extraer.
- HP: Es una unidad de potencia utilizada en el sistema anglosajón de unidades. Su nombre es el caballo de potencia o caballo de fuerza.
- Hz: Abreviatura de Hertz. Es la unidad en la que se mide la frecuencia de variación de la corriente alterna ó C.A.
- IP: La relación entre la tasa de producción de un pozo y el Drawdown se denomina índice de productividad
- IPR: Se define como la relación funcional entre el caudal de producción y la presión dinámica de fondo.
- LNV: Levantamiento neto vertical. Es la cabeza en pies que requiere levantar la bomba desde el nivel dinámico de fluido

NPSH: Cabeza de succión neta positiva

PIP: Presión de entrada a la bomba.

Pb: Presión de burbuja

Pf: Pérdidas por fricción: Son las pérdidas por fricción en el interior de la tubería y demás accesorios

RETIE: Reglamento técnico de instalaciones eléctricas

Rs: Relación de gas-aceite en solución.

SB: Arrancador directo ó Swichboard

SDT: Transformador reductor

SGg: Gravedad específica del gas.

SGo: Gravedad específica del aceite

SS: Arrancador suave ó Soft Starter

SUT: Transformador elevador

T: Temperatura

TDH: Levantamiento total generado, carga dinámica total o cabeza dinámica total en pies

THP: Presión en la cabeza de pozo

V: Abreviatura de Voltios ó Volts. Unidad básica de medida de la tensión eléctrica.

VSD: Controlador de frecuencia variable ó variador

Vg: Volumen de gas

Vo: Volumen de aceite

Vw: Volumen de agua

- ft: Abreviatura para pie. El pie es una unidad de longitud de origen natural (basada en el pie humano), ya utilizada por las civilizaciones antiguas.
- kV: Abreviación implementada de kilo Voltios ó kilo Volts. Los kilo Volts son una unidad de medida de la tensión eléctrica. Equivalente a 1000 Voltios.
- kVA: Abreviatura de kilo-Voltio-Amperios. La cual es una unidad de medida de la potencia aparente.
- psi: Existen dos escalas para medir presión en psi una cuyo valor cero se encuentran a la presión ambiente que equivale a una atmósfera. En general no se especifica que la presión atmosférica no sea considerada y se llama psi o psig. Por otro lado cuando es necesario dejar claro que se toma en cuenta la presión atmosférica se usa psia cuyo cero está realmente a presión
- rpm: Revoluciones por minuto (rpm, RPM o r/min) es una unidad de frecuencia, empleada frecuentemente para medir la velocidad angular. En este contexto, una revolución es una vuelta de una rueda, un eje, un disco o cualquier cosa que gire sobre su propio eje.
- °R: Grados Rankine: Unidad de temperatura para los gases.

RESUMEN

TITULO

METODOLOGÍA PARA LA ESPECIFICACIÓN DEL MOTOR EMPLEADO EN EL SISTEMA DE BOMBEO ELECTROSUMERGIBLE DE CRUDO*

AUTORES

NORA YOSELLY MALAVERA CASTRO
RUSSDEL RAMÍREZ TRUJILLO**

PALABRAS CLAVES

Sistema de Levantamiento Artificial, Bombeo Electrosumergible, Unidad de Bombeo, Motor de inducción, cable de alimentación.

DESCRIPCIÓN

Este proyecto desarrolla una metodología a través de una herramienta software para seleccionar el motor en una instalación de bombeo electrosumergible, y así aumentar la eficiencia del sistema de levantamiento artificial.

La metodología se desarrolla en diez pasos: ingreso de los datos del pozo a evaluar, selección bomba y motor, selección variador, selección cable de alimentación del motor, modelado del motor, modelado del transformador elevador, modelado del transformador reductor, modelado del cable de alimentación del motor, simulación del sistema y análisis de resultados.

Los pasos de la metodología se resumen en una herramienta software que se compone de seis pestañas: la pestaña de Presentación, la pestaña de Bombeo, la pestaña de Motor, la pestaña Transformador, la pestaña Cable y la pestaña Simulación. La pestaña de presentación, muestra el nombre del proyecto, así como el nombre de los autores y del director del proyecto. La pestaña de Bombeo, permite el ingreso de los datos del pozo. La pestaña Motor, realiza el modelado del motor de inducción. La pestaña de Transformador, permite modelar los transformadores. La pestaña de Cable, permite modelar el cable de alimentación del motor. La pestaña Simulación, permite simular el sistema eléctrico que conforma una instalación de bombeo electrosumergible y visualizar los resultados de esta simulación.

*Proyecto de Grado

**Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones. Director: Hermann Raúl Vargas Torres.

ABSTRAC

TITLE

METHODOLOGY FOR THE MOTOR SPECIFICATION, USED IN THE ELECTRICAL SUBMERSIBLE PUMPS SYSTEM OF CRUDE *

AUTHORS

NORA YOSELLY MALAVARA CASTRO
RUSSDEL RAMÍREZ **

KEYWORDS

Artificial Lift System, Electrical Submersible Pumps, Pumping Unit, Induction motor, Power Cable.

DESCRIPTION

This project develops a methodology through a software tool to select the motor in a Electrical Submersible Pumps, thereby increasing the efficiency of artificial lift system.

The methodology is developed in ten steps: data input of the well to evaluate, selection variator, selection power cable of the motor, modeling of the motor, modeling of the step-up transformer, modeling of the step-down transformer, modeling of the power cable of the motor, simulation of the system and analysis of results.

The steps of the methodology summarize in a tool software that is made out of six tabs themselves: Presentation tab, Pumping's tab, Motor's tab, the Transformer's tab, the Cable's tab and the Simulation tab. The tab of Presentation, sign the name of the project, as well as the name of the authors and of the director of the project. Pumping's tab, it enables the entrance of the data of the well. The Motor's tab, realize the modeling of the motor of induction. Transformer's tab, it allows modeling transformers. Cable's tab, it allows modeling the power cable of the motor. The tab Simulation, simulating the electric system permits that conform an installation of, Electrical Submersible Pumps and visualizing the results of this simulation.

*Degree Project

**Industrial University of Santander. Faculty of Physical-Mechanical Engineering. School of Electrical Engineering, Electronics and Telecommunications. Director: Hermann Raúl Vargas Torres.

Capítulo 1

INTRODUCCIÓN

Introducción

Este capítulo presenta y describe el problema que esta tesis aborda. Después define los objetivos de la tesis. Finalmente detalla la organización de la exposición.

1.1. Planteamiento del problema

Desde hace varios años en la industria petrolera se viene trabajando en el desarrollo de nuevos y diversos métodos para la extracción de crudo, entre los que se encuentra el bombeo electrosumergible (B.E.S), el cual se remonta al año de 1928 cuando fue implementado por primera vez. Desde entonces, se ha venido instalando por el mundo entero, demostrando ser un sistema de extracción eficiente y económico para volúmenes de fluidos relativamente altos desde grandes profundidades.

Con el transcurso del tiempo, las compañías dedicadas a la extracción de crudo por medio de los sistemas B.E.S, han obtenido tan vasta experiencia en su implementación que sumado a los adelantos tecnológicos de hoy, se encuentran instalando ésta clase de sistemas en pozos en los cuales antiguamente se consideraba imposible su utilización.

Motivo por el cual se hace necesario el estudio dentro de las universidades de los sistemas de bombeo electrosumergible, con miras a mejorar su versatilidad, eficiencia e importancia dentro de la diversa gama de sistemas de extracción de crudo que forman parte de la industria petrolera.

Dentro del material desarrollado en la universidad sobre los sistemas de bombeo electrosumergible; el diseño, la selección y especificación de los diversos elementos que conforman ésta clase de sistema, ha sido elaborado por ingenieros de petróleos [1, 2, 3, 4]. Estos se enfocan en la selección de los elementos mecánicos y de conducción del crudo, tocando de manera muy superficial el sistema de potencia eléctrico.

Esta es la razón por la cual este proyecto presenta una herramienta software basada en la metodología ya desarrollada por parte de los ingenieros de petróleos, pero enfocada hacia el sistema eléctrico que forma parte de los sistemas de bombeo electrosumergible y especialmente en la especificación del motor de inducción y su cable de alimentación según las especificaciones RETIE. Ya que estos son pieza fundamental dentro del sistema de extracción, de su eficiencia y del costo monetario final de los sistemas B.E.S.

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo general

Diseñar y elaborar una herramienta software para la especificación del motor del sistema de bombeo electrosumergible de crudo. (B.E.S)

1.2.2. Objetivos específicos

El cumplimiento del objetivo general del proyecto comprende lo siguiente:

- Revisar la literatura sobre los métodos existentes para la determinación de los motores empleados en el sistema de bombeo electrosumergible de crudo.

- Proponer una metodología para especificar las características de placa del motor de inducción a utilizar en los sistemas de bombeo electrosumergible de crudo, así como los parámetros necesarios para la selección de su cable de alimentación y protecciones eléctricas relacionadas siguiendo las especificaciones RETIE.
- Implementar una herramienta software empleando Matlab, que recoja la información de varios proveedores y ayude a determinar cuáles son los elementos más adecuados para la instalación eléctrica del sistema de bombeo electrosumergible, a partir de los resultados obtenidos a través de las simulaciones hechas en ATP.
- Crear un puente de comunicación informático entre el ATP y la interfaz gráfica desarrollada en MATLAB, para utilizar los modelos del motor de inducción y cables contenidos en el ATP.

1.3. Organización de la presentación

La tesis está organizada en 6 capítulos y 4 apéndices. El capítulo 2 presenta la descripción del sistema de bombeo electrosumergible. En este se detallan los elementos básicos que conforman estos sistemas.

El capítulo 3 revisa los conceptos básicos para el diseño de los sistemas de bombeo electrosumergible. Se detalla la información mínima necesaria para el diseño de los sistemas de bombeo electrosumergible así como las ecuaciones implementadas para este fin.

El capítulo 4 presenta la interfaz gráfica de la herramienta software creada. Se revisa el procedimiento básico a seguir para la correcta ejecución de la interfaz gráfica y los cálculos efectuados del caso tipo desarrollado.

El capítulo 5 realiza el análisis de los resultados. Presenta las señales obtenidas a partir de las simulaciones efectuadas con la herramienta software desarrollada y las consideraciones que estas involucran.

Para finalizar, en el capítulo 6 se exponen las conclusiones y aportaciones realizadas en esta tesis. También se sugieren líneas de trabajo para futuros desarrollos.

Como ya se dijo, complementario a lo anterior se encuentran los apéndices. El apéndice A presenta los conceptos básicos empleados por el ATP para la creación de sus modelos matemáticos para el motor de inducción y el cable de alimentación del motor.

El apéndice B presenta una serie de figuras involucradas en el proceso de diseño de los sistemas B.E.S.

El apéndice C presenta una serie de tablas involucradas en el proceso de diseño de los sistemas B.E.S.

El apéndice D presenta el manual del usuario creado para la correcta instalación y ejecución de la herramienta software desarrollada en la presente tesis.

Capítulo 2

MARCO TEÓRICO

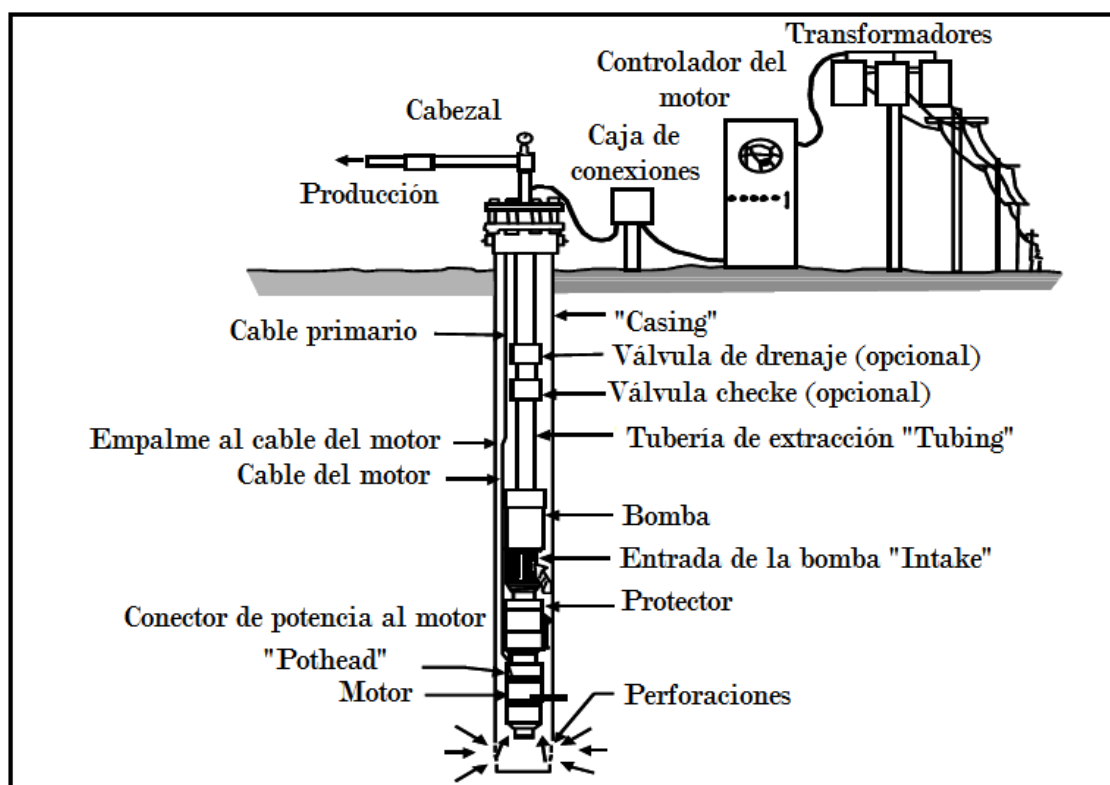
Introducción

Este capítulo presenta y describe de forma breve los elementos básicos, que componen los sistemas de bombeo electrosumergible de crudo encontrados en las tesis desarrolladas por ingenieros de petróleos dentro de la universidad y se complementa con alguna documentación externa [1, 2, 3, 4, 7].

2.1. El sistema de bombeo electrosumergible (B.E.S)

Desde hace varios años en la industria petrolera se viene trabajando en el desarrollo de nuevos y diversos métodos para la extracción de crudo, entre los que se encuentra el bombeo electrosumergible. Este se distingue de otros, debido a que la unidad de impulso o motor, está directamente acoplada con la bomba en el fondo del pozo.

En la figura 2.1, se pueden observar los elementos básicos que conforman los sistemas B.E.S y su ubicación dentro de este, así como la configuración básica de los sistemas B.E.S.



Fuente: SCHLUMBERGER -ARTIFICIAL LIFT

Figura 2.1: Configuración básica de un sistema B.E.S.

2.2. Equipos superficiales

Como muestra la figura 2.1, son aquellos equipos ubicados sobre el nivel del suelo. Están encargados de transformar y suministran la energía eléctrica necesaria para operar los equipos de fondo, así como del sellado del pozo en su superficie, el paso de los cables al interior del pozo y el transporte del crudo a sus respectivos tanques de almacenamiento.

De acuerdo con el diseño, se puede encontrar en la superficie los siguientes elementos:

- Transformadores

- Variador de velocidad o los controladores del motor
- La caja de venteo
- El cabezal del pozo

2.2.1. Transformador reductor (SDT)

El transformador reductor o SDT, se usa en caso de que la energía suministrada al sistema, provenga de una línea eléctrica de distribución de media tensión¹. Este transformador reducirá la tensión de la línea al nivel requerido por el variador de frecuencia, el cual se encuentra entre los 460 y 380 V. Sí la energía proviene de generadores de potencia, estos suministran directamente la tensión requerida a través del variador de frecuencia o por el panel de control.

2.2.2. Transformador elevador (SUT)

El transformador elevador o SUT, se encarga de incrementar la tensión suministrada al alimentador por el variador o controlador de frecuencia al nivel nominal requerido por el motor para su operación. Estos transformadores aumentan la tensión de un sistema de 480 V a niveles entre los 800 a 4000 V.

2.2.3. Controladores del motor

Existen tres tipos de controladores de motor:

1. Arrancador directo o switchboard (SB)

Consiste en un arranque con un conjunto de circuitos en estado sólido, con protecciones de sobrecarga. La potencia tanto a la entrada como a la salida tiene una frecuencia constante de 60 Hz, por lo tanto el motor siempre gira aproximadamente a 3600 rpm. Los arranques del motor son bruscos con este tipo de tablero.

¹[15] NTC 1340: Las líneas de media tensión, varían su nivel de 11,4 kV a 57,5 kV

2. Arrancador suave o soft starter (SS)

Es similar a un arrancador directo, ya que previene al motor de cambios bruscos en la corriente. Pero está diseñado para controlar la corriente y la tensión en los bornes del motor durante el periodo de arranque. Permite incrementar gradualmente la frecuencia, hasta alcanzar los 60 Hz nominales del sistema una vez encendido el motor.

3. Controlador de frecuencia variable (VSD)

Una bomba electrosumergible queda limitada cuando se opera a una frecuencia fija. El variador de frecuencia variable o variador elimina esta restricción, permitiendo cambiar la frecuencia y por tanto la velocidad de la bomba. Esto permite que sin modificar el equipo de fondo, se pueda operar la bomba para la producción de un amplio rango de caudales y satisfacer un conjunto de condiciones de operación bastante amplio.

Además protege el equipo de fondo contra las variaciones de tensión del sistema, controla la corriente, mantiene constante la relación V/Hz y extiende la vida útil del equipo de fondo, mediante el arranque y apagado suave.

2.2.4. Caja de venteo o de conexiones (Vent Box)

Está localizada entre el cabezal de pozo y el tablero de control por razones de seguridad. Cumple la función básica de proveer venteo a la atmósfera del gas que se puede colar a través del cable de potencia. Es un punto de fácil acceso, que permite hacer en su interior la conexión entre el cable de potencia que viene del tablero de control y el cable de potencia que alimenta el motor. Igualmente, permite realizar pruebas y verificar las condiciones eléctricas del equipo que se encuentran en el fondo.

2.2.5. Cabezal del pozo

Está constituido por el conjunto de válvulas de control del pozo y otros accesorios, así como la tubería de producción. Conecta el sistema de potencia de superficie con el cable de potencia del subsuelo. El cabezal de boca de pozo debe estar equipado con un dispositivo penetrador que selle alrededor del cable y la tubería de producción para evitar fugas de gas imprevistas en el pozo. Se dispone de varios métodos diferentes de sellado, según los distintos proveedores de cabezales. Dependiendo del método empleado, el sello soportará entre 500 - 3000 psi.

2.3. Equipos de subsuelo

El equipo de subsuelo está constituido entre otros elementos por el equipo de fondo, el cual se considera como el corazón del sistema bombeo electrosumergible y opera dentro del pozo, a la profundidad calculada para el cabezal de fondo.

Entre los elementos más destacados se encuentran:

- El sello o protector
- Tubería de extracción ó Tubing
- La bomba
- El intake o entrada a la bomba
- El motor eléctrico
- El cable de potencia
- Los componentes opcionales

2.3.1. El sello o protector

Es un elemento de diseño especial, que se conecta entre el eje del motor y la bomba o separador de gas. Es una pieza vital en el ensamblaje y si no se selecciona apropiadamente, puede reducir la vida útil del equipo. El protector está formado por un conjunto de cámaras, las cuáles contienen una serie de laberintos por donde circula un aceite dieléctrico.

Sus funciones principales son:

- Conectar el motor con la bomba mediante los conectores (“couplings”) que se colocan en los ejes del motor y la bomba.
- Soportar las fuerzas de empuje producida por las etapas de la bomba y la cabeza del fluido, para que no sean transmitidas al motor.
- Evitar que el fluido del pozo contamine el fluido dieléctrico del motor igualando la presión del aceite con la del fluido del pozo.
- Igualar la presión del fluido dieléctrico en su interior con la del fluido externo dentro del pozo, eliminando presiones diferenciales a través de los elementos de sellado del eje.
- Absorbe la expansión y contracción del aceite del motor, debido a su calentamiento y enfriamiento cuando está operando o detenido respectivamente.

2.3.2. Tubería de extracción (Tubing)

Consiste en la tubería por la cual se conduce el crudo desde el fondo del pozo hasta la superficie. Está constituido por secciones, tramos de tubo o tubos que van siendo instalados uno sobre el otro hasta alcanzar la profundidad deseada. Esta tubería puede ser nueva o vieja. Factor que se debe considerar al momento de determinar las pérdidas por fricción así como su diámetro interno, con el fin de poder determinar con exactitud la cabeza dinámica total a levantar.

Especificaciones de la tubería de producción de petróleo

| Tubería de producción | Tamaño in | OD (in) | | Muro (in) | Grado | Largo (mm) | | | | |
|-----------------------|-----------|----------|-------|----------------------|-----------------------------|-----------------------------|------------------------|------|-----------|------|
| | | Estándar | EUE | | | | | | | |
| | 23/8 | 2.375 | 2.594 | 0.190 | J55 N80 L80 C90 T95 P110 | 8530~9750 | | | | |
| | 27/8 | 2.875 | 3.094 | 0.217 | | | | | | |
| | 31/2 | 3.500 | 3.750 | 0.254 | | | | | | |
| Empalme | Tamaño in | OD (in) | | Longitud mínima (in) | | Grado | Ancho del extremo (in) | | Peso (kg) | |
| | | Estándar | EUE | Estándar | EUE | | Estándar | EUE | Estándar | EUE |
| | 23/8 | 2.875 | 3.063 | 4 1/4 | 47/8 | J55 N80 L80 C90 T95 P110 | 3/16 | 3/16 | 1.28 | 1.55 |
| | 27/8 | 3.500 | 3.668 | 5 1/8 | 51/4 | | | 7/32 | 2.34 | 2.40 |
| | 31/2 | 4.250 | 4.500 | 5 5/8 | 53/4 | | | 1/4 | 3.71 | 4.10 |

Cuadro 2.1: Especificaciones de la tubería de producción de petróleo

Fuente: Yaou Rugao pág. web

<http://www.yaoumachinery.es/7-oil-production.html>

2.3.3. Bomba

Las bombas sumergibles son centrifugas de múltiples etapas. El tipo o geometría de la etapa determina el volumen de fluido que maneja la bomba y el número de etapas determina el levantamiento total generado (TDH). Las bombas se construyen en un amplio rango de capacidades para aplicaciones en diferentes tamaños de casing y el número de etapas se designa de acuerdo con el punto de máxima eficiencia (BEP).

Cada etapa de la bomba está formada por un impulsor, la cual es la parte en movimiento que transfiere la energía mecánica a un fluido por la acción rotativa y gira dentro del difusor, que es la parte estática. En resumen:

A medida que el impulsor gira, todo el fluido que entra en él, se expulsa por acción de la fuerza centrífuga haciéndolo llegar a las paredes del difusor; el cual por su diseño hace que el fluido llegue al impulsor de la siguiente etapa y se repita esta acción sucesivamente. A mayor número de etapas, mayor es la presión desarrollada por la bomba, ya que la velocidad inicial del fluido a la entrada de cada una de las etapas va aumentando, hasta convertir ese incremento progresivo de velocidad en presión.

2.3.4. Entrada a la bomba (Intake)

Se encarga de conducir el fluido del pozo al interior de la bomba. Debido a las características de turbulencia que produce el fluido a la entrada de la bomba, el intake tiene un eje debidamente soportado por bujes de alta resistencia a la abrasión que dan soporte al eje de la bomba, evitando movimientos axiales.

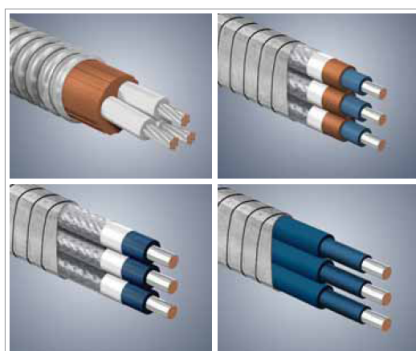
Es importante tener en cuenta la ubicación de este dispositivo durante el diseño del sistema, ya que su posicionamiento dentro del pozo afecta directamente los cálculos de potencia necesaria para el levantamiento del crudo, se requiere de un nivel de cabeza suficiente para que el crudo ingrese a la bomba por los orificios del intake, sin que se produzca el fenómeno de cavitación y el fluido se puede tomar por el primer impulsor de la bomba.

2.3.5. El motor eléctrico

Los motores utilizados en las operaciones de bombeo electrosomergible son de inducción trifásicos, tipo jaula de ardilla, de dos polos y operan a una frecuencia nominal de 60 Hz. Se encarga de convertir la energía eléctrica en energía mecánica y suministrar la potencia mecánica necesaria para mover la bomba, de acuerdo con los requerimientos de potencia y la cabeza total dinámica a levantar.

Estos motores, se llenan con un aceite mineral altamente refinado y de alta resistencia dieléctrica, que permite lubricar las partes giratorias del motor y transferir el calor generado hacia la carcasa, donde se disipa por el fluido de producción. Lo anterior hace importante que el fluido de producción pase por la carcasa del motor a una velocidad mínima, para que se garantice la refrigeración del motor.

La tensión de diseño y operación de estos motores pueden ser tan bajos como 230 V o tan altos como 4 kV. Los requerimientos de corriente pueden ir desde 17 A hasta los 110 A y la potencia necesaria se alcanza al alargar o incrementar la longitud del motor. Por lo que un solo motor puede alcanzar 33 ft (10,06 m) de longitud y llegar a desarrollar una potencia de 1170 HP.



Fuente: SCHLUMBERGER-WCP-Artificial Lift System

Figura 2.2: Configuración de cables de potencia

2.3.6. Cable de potencia.

El cable de potencia es uno de los componentes más importantes y sensibles en el sistema. Su función principal es la de transmitir la energía eléctrica desde la superficie al motor. Además, puede transmitir las señales de presión y temperatura registradas por el sensor de fondo a la superficie.

Los conductores pueden tener una barrera protectora o fibra trenzada sobre el aislamiento. Los conductores se encamisán para proveer protección mecánica, química y finalmente se envuelven con una armadura metálica. Los materiales generalmente utilizados en la fabricación de dichos componentes se presentan en la tabla C.10 de Anexo C Tablas.

El éxito o fracaso de la instalación depende en gran parte de la adecuada selección del cable de potencia para las condiciones de operación. En pozos muy profundos que requieren cables especiales, el cable puede ser el componente más costoso del sistema.

Los cables están disponibles en configuración redonda y plana como muestra la figura 2.2. Los conductores a su vez pueden ser sólidos, trenzados o compactos.

2.3.7. Componentes opcionales

Los componentes opcionales, son elementos que no son indispensables para bombear el crudo y su utilización depende de los requerimientos que tenga el operador o de las características especiales de cada pozo. Los componentes opcionales más usuales son:

1. Sensor de fondo

Verifica el correcto funcionamiento del equipo. Según las necesidades puede realizar mediciones en la presión de entrada a la bomba, la temperatura de fondo, la vibración del motor, las fugas de corriente del sistema eléctrico y la temperatura del devanado del motor o del aceite del motor.

2. Válvula cheque

Se localiza usualmente de 2 a 3 tubos sobre la cabeza de descarga de la bomba. Se utiliza para mantener la columna de fluido sobre la bomba, cuando el motor está apagado. Si la válvula cheque falla o no se instala, el escurrimiento del fluido del tubing hacia bomba puede causar una rotación en reversa tanto en la bomba como en el motor.

Se recomienda instalar la válvula en pozos profundos con baja presión de fondo y en ambientes de arena moderados evitando de esta forma el asentamiento de la arena sobre la bomba cuando ésta se apaga. En instalaciones donde la válvula cheque no es puesta, se recomienda dejar el tiempo suficiente para que el fluido del tubing drene hacia la bomba antes que el motor sea reiniciado. Típicamente se recomienda un tiempo de 30 minutos.

3. Válvula de drenaje

Cuando se emplea la válvula cheque, también se recomienda instalar una válvula de drenaje seguidamente de la válvula cheque para prevenir que el tubing esté lleno durante reparaciones o cuando se saque el equipo. La función de esta válvula es la de evacuar todo el fluido que pueda estar en el tubing al momento de sacar el equipo del pozo.

4. Válvula de seguridad

Se instala entre 600 y 800 pies (182,88-243,84 m) de profundidad, está normalmente cerrada, se mantiene abierta a través de una línea de control presurizada a 3000 psi. Su instalación depende de los requerimientos de seguridad del área. La válvula se cierra en el evento de que se rompa la línea de flujo o por la pérdida de presión de la línea de control.

Capítulo 3

CONCEPTOS Y ECUACIONES BÁSICAS PARA EL DISEÑO DE UN SISTEMA DE BOMBEO ELECTROSUMERGIBLE

Introducción

Este capítulo presenta la información mínima requerida y las ecuaciones fundamentales empleadas por los ingenieros de petróleos para el diseño de los sistemas de bombeo electrosumergible. Además muestra las ecuaciones y criterios propuestos para la determinación del equipo eléctrico, sobre los cuales está basada la herramienta software desarrollada en el presente proyecto [1, 2, 3, 4, 5, 6].

3.1. Conceptos básicos para el diseño de sistemas de bombeo electrosumergible

Para garantizar que el sistema de bombeo electrosumergible sea el apropiado para un determinado pozo, existe un conjunto mínimo de datos iniciales que deben ser confiables y actualizados para poder realizar el diseño adecuado. A continuación se presenta ese conjunto de datos requeridos, y una pequeña introducción sobre su función y/o definición.

- Diámetro interno, longitud del casing

Se debe conocer la longitud del casing y su diámetro interno para garantizar que la unidad de bombeo electrosumergible encaje dentro del casing.

- Profundidad de los intervalos perforados

Se requiere conocer la profundidad de los intervalos perforados, para poder ubicar el equipo de fondo a una cabeza que permita una circulación adecuada del crudo a su alrededor, teniendo en cuenta también que el fluido del yacimiento se encarga de refrigerar el motor cuando se encuentra en operación. Debido a que el motor depende del flujo del fluido del pozo para enfriarse, un sistema BES estándar nunca se debe ubicar por encima o por debajo de las perforaciones del pozo o la zona productora a menos que el motor esté encamisado.

- Tamaño y rosca de la tubería de producción

El tamaño de la tubería de producción es de suma importancia para calcular cuanta pérdida por fricción se debe incluir en el diseño. Éste valor de pérdidas por fricción es uno de los tres parámetros empleados en el cálculo de la carga total en pies que debe vencer la bomba para lograr llevar hasta la superficie el fluido de producción desde el fondo. Con el tipo de rosca y el tamaño de los tubos se escogerá el tipo adecuado de rosca de las diferentes válvulas, acoples y cabezal de pozo.

- Gravedad API del aceite, corte de agua y relación gas-petróleo (GOR)

Mide la densidad de los fluidos que se están produciendo en el pozo y contribuye en la determinación de la potencia requerida por la bomba para levantar el crudo desde el interior del pozo hasta la superficie.
- Gravedad específica de los líquidos y del gas que se van a producir

Estos valores permiten calcular la potencia que se requiere para producir el fluido, el cual es una mezcla de agua, aceite y gas en determinados casos.
- Temperatura de fondo de pozo (BHT)

Brinda la pauta para conocer cuánto se puede llegar a refrigerar el motor con el fluido de producción, así como también es un dato importante al momento de especificar el equipo a utilizar.
- Presión de cabeza de pozo (THP)

Presión a la cual debe salir el fluido de producción para garantizar que el mismo llegue hasta la estación de recolección o batería. Este valor se incluye en los cálculos de la carga dinámica total en pies (TDH).
- Presión promedio de reservorio (P_s)

La presión promedio de reservorio se asume como la presión estática que se desarrolla a una distancia del pozo igual al radio de drenaje (r_e). Para mayores distancias que r_e , la presión se mantiene constante. Éste valor de presión se puede obtener de ensayos de formación tipo Drawdown.
- Presión dinámica de fondo (P_{wf})

Es la presión que se desarrolla en la cara de la formación, o sea en las paredes del pozo donde se encuentran las perforaciones. Ésta se puede determinar con ensayos de formación, perfiles de presión o con sensores de fondo.

- Índice de productividad (IP)

La relación entre la tasa de producción de un pozo y el Drawdown se denomina índice de productividad (IP). A menos que se especifique otra cosa, el IP se basa en la producción neta de fluidos (agua, aceite). Permite conocer la capacidad de producción que tiene el pozo al generarse una caída de presión en el mismo.

- Relación de desempeño de flujo (IPR)

Éste se define como la relación funcional entre el caudal de producción y la presión dinámica de fondo. El IPR se define en el rango de presión desde la presión promedio de reservorio y la presión atmosférica. Garantiza que la unidad no quede sobre ni subdiseñada.

- Presión de entrada a la bomba (PIP)

En operaciones con bombas sumergibles, es de suma importancia determinar los pies de fluido sobre la bomba o la presión de entrada a la bomba en un pozo. Debido a que la PIP se encarga de suministrar la cabeza¹ necesaria para que el líquido entre por el orificio del primer impulsor. Hay dos valores a considerar para la presión de entrada a la bomba.

- Presión de entrada a la bomba requerida: Es la presión de entrada necesaria para alimentar adecuadamente la bomba y prevenir cavitación o traba por gas. También se conoce como la N.P.S.H (Cabeza de succión neta positiva) requerida.
- Presión de entrada a la bomba disponible: Es la presión de operación de cada instalación en particular.

- Tensión disponible en superficie (V_s)

Es el rango de tensión disponible para mantener la relación V/f .

- Cálculo de gas

Con el fin de saber si existe la necesidad de instalar algún tipo de accesorio que ayude con el manejo del gas, se hace necesario calcular la cantidad de

¹Columna de fluido que se encuentra por encima de la bomba.

gas presente en la entrada a la bomba o intake, ya que la presencia de este gas produce variaciones continuas en la densidad y la presión del crudo dentro del sistema.

En múltiples casos la determinación exacta de esta relación gas-aceite es algo complicada. Existen una serie de ecuaciones más conocidas como las correlaciones de Standing [1, 4] para la relación gas-aceite y el factor volumétrico de formación.

3.2. Ecuaciones para el diseño del sistema BES

A continuación se presentan de forma ordenada las diferentes ecuaciones empleadas en el diseño de un sistema de bombeo electrosumergible de crudo y la nomenclatura involucrada en ellas.

3.2.1. Relación de gas aceite en solución (R_s)

La determinación de la relación gas aceite en solución está dada por la ecuación (3.1)

$$R_s = SG_g \left(\frac{P_b}{18} * \frac{10^{0,0125*API}}{10^{0,00091*T}} \right)^{1,2048} \quad (3.1)$$

Dónde:

SG_g = Gravedad específica del gas

P_b = Presión de burbuja en psi

T = Temperatura de fondo del pozo en °F

Factor volumétrico de formación del aceite (B_0)

El factor volumétrico de formación del aceite está dado por la ecuación (3.2)

$$B_0 = 0,972 + 0,00147 * F^{1,175} \quad (3.2)$$

De la cual:

$$F = R_s \left(\frac{SG_g}{SG_0} \right)^{0,5} + 1,25 * T \quad (3.3)$$

Dónde:

SG_g = Gravedad específica del gas

SG_0 = Gravedad específica del aceite

T = Temperatura de fondo del pozo en °F

Factor volumétrico del gas (B_g)

El factor volumétrico del gas, se encuentra determinado a través de la ecuación (3.4)

$$B_g = 5,04 * \left(\frac{Z \cdot T}{P} \right) \quad (3.4)$$

Dónde:

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

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

P = Presión de sumergencia en psi

3.2.2. Volumen total de fluidos

Una vez determinados los tres valores de R_s , B_0 y B_g ; los volúmenes de crudo, agua y gas libre se puede estimar y calcular en sus porcentajes correspondiente a partir de los datos de producción, cuando se conoce la relación gas-aceite (GOR) usando las siguientes ecuaciones:

$$Gas_{TOTAL} = \left(\frac{GOR_{producción} * BOPD}{1000} \right) MCF \quad (3.5)$$

El gas en solución a la profundidad de asentamiento se puede determinar mediante la expresión dada por la ecuación (3.6):

$$Gas_{en\ solución} = \left(\frac{R_s * BOPD}{1000} \right) MCF \quad (3.6)$$

El gas libre que pasa a través de la entrada a la bomba, se calcula cómo muestra la ecuación (3.7):

$$Gas_{Libre} = (Gas_{TOTAL} - Gas_{en\ solución}) MCF \quad (3.7)$$

Para el cálculo del volumen de aceite (V_0), de agua (V_g) y de gas (V_w) a la profundidad de asentamiento de la bomba se emplean las ecuaciones (3.8), (3.9) y (3.10) respectivamente.

$$V_0 = (BOPD * B_0) BOPD \quad (3.8)$$

$$V_g = (Gas_{Libre} * B_g) BGPD \quad (3.9)$$

$$V_w = (BWPD * B_w) BWPD \quad (3.10)$$

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

$$V_T = (V_0 + V_g + V_w) B/s \quad (3.11)$$

Cuando se realiza un diseño de un sistema de bombeo electrosumergible, se recomienda que el porcentaje de gas libre que pasa a través de la bomba no sea superior al 10% ya que un porcentaje superior puede traer consigo problemas de cavitación entre otros. Este porcentaje se puede calcular como muestra la ecuación (3.12).

$$Gas_{Libre} \% = \left(\frac{Gas_{Libre}}{V_T} \right) * 100 \% \quad (3.12)$$

3.2.3. Presión de entrada a la bomba

En operaciones con bombas sumergibles, es de suma importancia determinar los pies de fluido sobre la bomba o la presión de entrada a la bomba en un pozo. Para ello es importante conocer la gravedad específica o gradiente del líquido en el espacio anular, la cual está determinada por la ecuación

$$PIP = (P_{wf}) - \left(\frac{((Cabeza Pies) * (Gravedad específica fluido))}{2,31 Pies/PSI} \right) \quad (3.13)$$

Dónde:

P_{wf} = La nueva presión de flujo P_{wf} a la tasa deseada Q_d está dado por la ecuación

$$P_{wf} = P_R - \left(\frac{Q_d}{IP} \right) \quad (3.14)$$

Cabeza = Diferencia entre la profundidad del punto medio de perforaciones (PMP) y la profundidad de asentamiento de la bomba.

3.2.4. Cálculo de la cabeza dinámica total en pies (TDH).

La cabeza dinámica total (TDH) corresponde a la cantidad de trabajo necesaria que requiere realizar la bomba para que el fluido llegue a la superficie y está dada por la ecuación (3.15).

$$TDH = (LNV + Pf + THP) \text{ ft} \quad (3.15)$$

De la cual:

Levantamiento neto vertical (LNV). Es la cabeza en pies que requiere levantar la bomba desde el nivel dinámico de fluido y está determinado por la ecuación (3.16).

$$LNV = \text{profundidad de la bomba } ft - \left(\frac{PIP \text{ psi} * 2,31 \text{ ft/psi}}{\gamma_{liq}} \right) ft \quad (3.16)$$

THP es la cabeza requerida para que el fluido entre al sistema de superficie y llegue hasta la estación de recolección o batería. Se encuentra determinado por la ecuación (3.17).

$$THP = (THP \text{ psi} * 2,31 \text{ ft/psi}) ft \quad (3.17)$$

Pf= Pérdidas por fricción en el interior de la tubería y demás accesorios.

3.2.5. Selección del tipo de bomba

Tomando el valor de la cabeza dinámica total en pies calculada y el caudal deseado de diseño, se utiliza los catálogos de los proveedores y se mira en las tablas de datos de selección de las bombas, ejemplo la tabla C.9. A continuación se miran las figuras de comportamiento de la etapa una Bomba ejemplo figura B.2² y se escoge el tipo de bomba que tendrá la más alta eficiencia para producir dicho caudal dentro de la serie de bombas que podrían realizar el trabajo.

Determinación del tamaño óptimo

Con la ayuda de las curvas de comportamiento de las bombas presentadas en los catálogos por los fabricantes, se debe seleccionar un tipo de bomba, de tal forma que el diámetro de la bomba se ajuste al casing del pozo y que la tasa de

²Se aclara que tanto la tabla C.9 como la figura B.2 se refieren a los elementos seleccionados en la caso tipo presentado más adelante y que dependiendo del sistema a diseñar y los elementos seleccionados existe una gráfica especial para cada caso.

producción deseada se encuentre dentro del rango de capacidad recomendado de la bomba a la frecuencia deseada. También se debe determinar la cabeza producida y la potencia requerida por etapa a la máxima frecuencia de operación.

El número de etapas requerido para la cabeza dinámica total, se encuentra determinado a través de la ecuación (3.18), tamaño óptimo del motor y sello, así como verificar las limitaciones del equipo.

$$Total\ Etapas = \frac{TDH}{Cabeza\ por\ etapas} \quad (3.18)$$

Para calcular la potencia requerida de la bomba seleccionada se utiliza la ecuación (3.19), tomando de las curvas de desempeño por etapa, la potencia requerida por etapa de la bomba seleccionada:

$$HP = (etapas\ totales) * (HP\ por\ etapa) \quad (3.19)$$

Se debe tener especial cuidado al seleccionar el protector o sello del sistema, se recomienda usar como guía o referencia la tabla de aplicaciones de configuración del protector.

3.3. Ecuaciones propuestas para la determinación del equipo eléctrico y criterios de selección del aceite del motor

La selección del motor de inducción y su cable de alimentación generalmente se realiza teniendo en cuenta la potencia requerida por el sistema para llevar el crudo desde el fondo del pozo hasta la estación de recolección y las condiciones ambientales de operación, sin profundizar en aspectos tales como la corriente máxima a la que se pueden ver afectados estos elementos en un arranque brusco del motor, así como su tiempo de duración y el establecimiento de los límites a los cuales deben operar las protecciones eléctricas a implementar según el diseño.

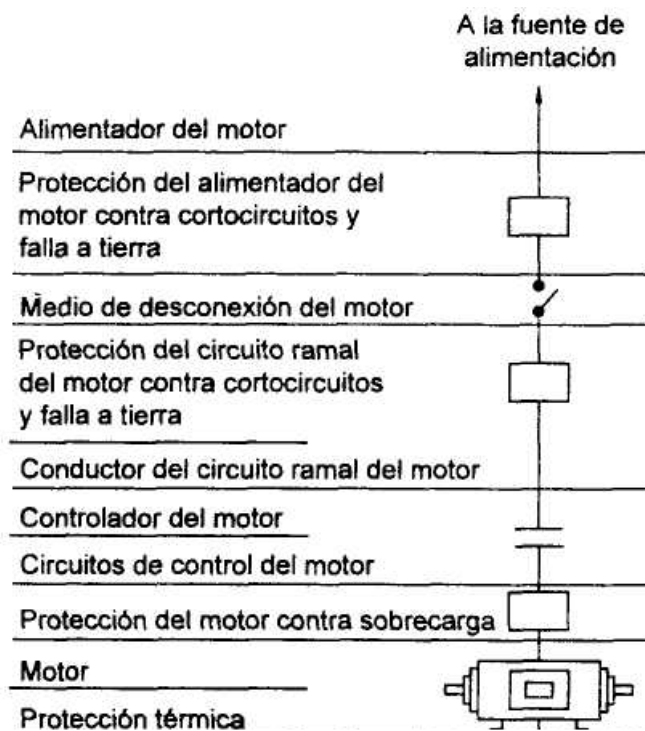


Figura 3.1: Diagrama Sistema Eléctrico
Fuente: [14] Código Eléctrico Colombiano - NTC 2050

3.3.1. Motor de inducción

La determinación del motor está dada principalmente por la potencia requerida para el accionamiento del sistema de bombeo y ajustado a las condiciones de trabajo requeridas. Tales como temperatura, tamaño y nivel de corrosión entre otras factores que puedan llegar a ser determinantes para su buen funcionamiento.

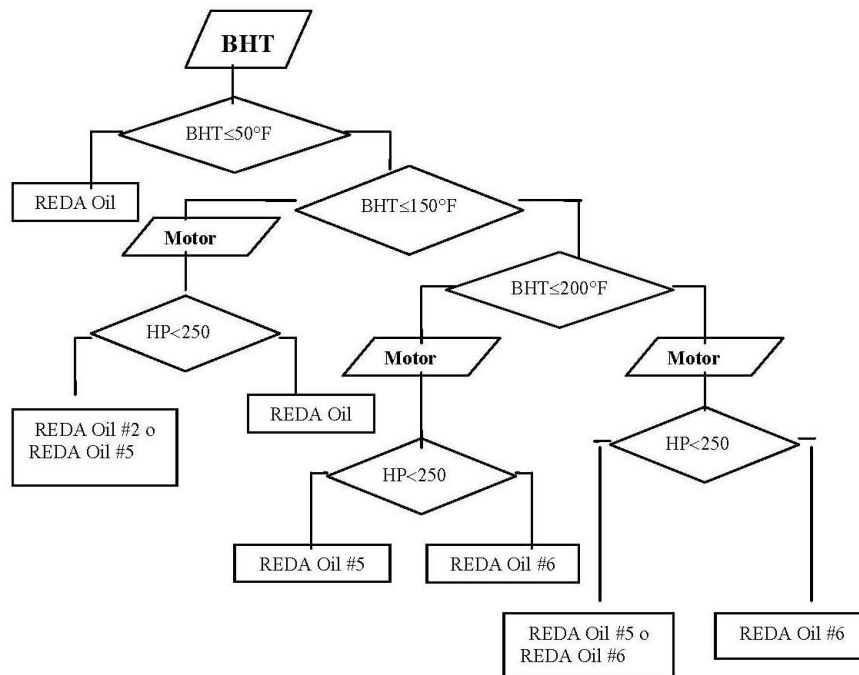
Durante la operación de los equipos y aparatos eléctricos, se pueden presentar algunos riesgos de operación que están presentes en forma potencial. Los normalmente considerados son:

1. Fallas por cortocircuito entre fases y/o a tierra.
2. Daños térmicos por:
 - a) Sobrecarga
 - b) Condiciones ambientales desfavorables
3. Condiciones anormales de operación como:
 - a) Baja o alta tensión

3.3.2. Aceite del motor

En la selección del aceite intervienen tres factores principales: 1) La temperatura de fondo de pozo (BHT) 2) La temperatura de operación del motor (MOT) y 3) La potencia del motor. En ciertas condiciones también la temperatura ambiente puede ser decisiva. La figura 3.2 muestra el diagrama de flujo con las recomendaciones básicas para la selección del aceite del motor y protector de acuerdo con la aplicación. Se asume que la velocidad del fluido que refrigera el motor es igual o mayor a 1 ft/s y que el incremento de temperatura del motor es menor que 100 °F (37,78 °C) sobre la temperatura externa del fluido [4].

En síntesis, en aplicaciones de pozos fríos $BHT \leq 50$ °F ($BTH \leq 10$ °C), use aceite # 3; en aplicaciones a temperatura regular 50 °F < BHT ≤ 150 °F (10 °C < BHT



Fuente: SCHLUMBERGER -WCP-Artificial Lift System

Figura 3.2: Diagrama para la selección del aceite del motor

$\leq 65,56$ °C) puede usar aceite # 2 o # 5 si el motor es de 250 HP o menor. Para potencias mayores a 250 HP se recomienda el uso de aceite # 6.

En aplicaciones a temperaturas entre 150 °F $< BHT \leq 200$ °F ($65,56$ °C $< BHT \leq 93,33$ °C) es recomendable usar aceite # 5 para motores de 250 HP o menor. Para potencias mayores a 250 HP se recomienda el uso de aceite # 6.

Para aplicaciones en pozos con temperatura de fondo $BHT \geq 200$ °F ($BHT \geq 93,33$ °C) el aceite # 5 o # 6 es recomendable en motores de hasta 250 HP. Para motores de potencias mayores se debe usar aceite # 6.

Si en cualquier aplicación el incremento de temperatura interna del motor es superior a 100 °F ($37,78$ °C) se debería usar aceite de un grado mayor de viscosidad al recomendado según el proceso mencionado anteriormente. El uso de aceite de mayor viscosidad aumenta la capacidad de carga de los cojinetes así como también ayudan a amortiguar vibraciones sobre los cojinetes radiales.

3.3.3. Capacidad nominal de aparatos de protección de motores

La corriente máxima de disparo de los relés de sobrecorriente o de otros dispositivos de protección de los motores no debe superar el 1,25 % para motores de menos de 600 V nominales y/o 1,15 % para motores de más de 600 V nominales³ de la capacidad nominal de corriente del variador⁴.

$$I_{Disparo} = F_M \times I_{Nominal\ motor\ máx} A \quad (3.20)$$

F_M es el factor por el cual se incrementa la corriente. Puede ser igual a 1,15 ó 1,25.

3.3.4. Selección de conductores.

Los conductores que alimentan los motores, deben tener como mínimo una capacidad de corriente igual a la corriente de disparo a la cual se ajusta el dispositivo contra sobrecargas o de otros dispositivos de protección de los motores. A su vez, se deben tener a consideración aspectos tales como el tamaño, tipo, longitud, temperatura, regulación y pérdidas de energía.

La capacidad de corriente de los conductores, puede ser tomada de las tablas suministradas por los proveedores o fabricantes de los mismos y corregida de ser necesario para la temperatura ambiente de trabajo como muestra la ecuación (3.21).

$$I_{conductor} = F_{corrección\ por\ temperatura} \times I_{tablas} A \quad (3.21)$$

La caída de tensión en el cable se obtiene con la ayuda de la siguiente gráfica 3.3 caída de tensión en el cable respecto de la corriente por cada 1000 ft (304,8 m) de cable.

³NTC 2050 Artículos 430-121 a 430-127

⁴Para motores de múltiples velocidades, se toma la mayor de las corrientes nominales a plena carga.

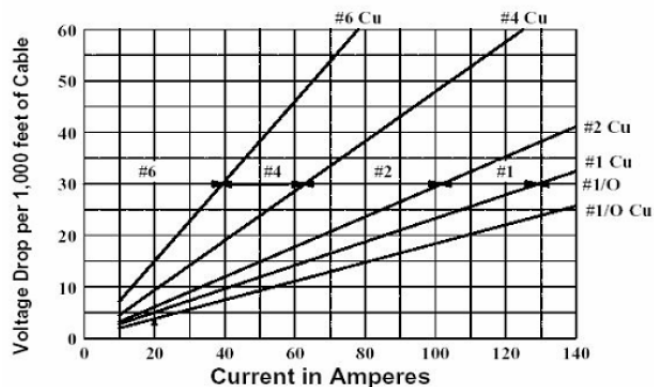


Figura 3.3: Caída de tensión en el cable respecto de la corriente por cada 1000 pies de cable

Fuente: REDA. Sumersible Pump Handbook

3.3.5. Variador

Para seleccionar el variador y los transformadores que serán utilizados, es necesario calcular la potencia eléctrica que requieren estos equipos con el fin de escoger el que mejor se ajuste a las condiciones de operación del equipo de subsuelo. La potencia eléctrica se mide en kVA y se puede calcular con la expresión (3.22).

$$S = \frac{\sqrt{3} * V_s * I}{1000} \text{ kVA} \quad (3.22)$$

Dónde:

V_s = Tensión en superficie

I = Corriente nominal del motor.

La tensión en superficie se calcula conociendo la tensión de operación del motor y las pérdidas en el cable con la ecuación (3.23).

$$V_s = (V_{OPE} + V_{pérdidas\ en\ el\ cable}) \text{ V} \quad (3.23)$$

La tensión de operación a la frecuencia de trabajo del equipo se calcula con la ecuación (3.24).

$$V_{OPE} = \left(\frac{f \text{ Hz}}{60 \text{ Hz}} * V_N \right) V \quad (3.24)$$

3.3.6. Protección del circuito ramal del motor contra cortocircuitos y fallas a tierra.

La capacidad nominal de los conductores o de los interruptores y dispositivos de protección del circuito ramal contra cortocircuito y falla a tierra, se debe basar en la capacidad máxima de funcionamiento rotulada en la placa de características del motor, del variador o de ambos.

3.3.7. Medios de desconexión del motor.

Debe tener una capacidad de corriente que sea como mínimo el 115 % de la capacidad nominal de corriente a plena carga.

3.3.8. Protección del alimentador del motor contra cortocircuitos y fallas a tierra.

Debe tener una capacidad o ajuste de disparo no superior a la mayor capacidad nominal o ajuste de disparo del dispositivo de protección del circuito ramal contra cortocircuitos y fallas a tierra⁵.

3.3.9. Conductor alimentador del sistema.

Los conductores que alimentan los motores, deben tener como mínimo una capacidad de corriente igual a la corriente disparo a la cual se ajusta el dispositivo

⁵Basado en el valor máximo permitido para el tipo específico de un dispositivo protector mostrado en la tabla 430-152 de la NTC2050

contra sobrecargas y corregida de ser necesario para la temperatura ambiente de trabajo de la siguiente forma.

$$I_{conductor} = F_{corrección\ por\ temperatura} \times I_{tablas\ A} \quad (3.25)$$

Capítulo 4

IMPLEMENTACIÓN DE LA METODOLOGÍA Y RESULTADOS.

Introducción

En este capítulo se presenta la interfaz gráfica de la herramienta software creada, así como el procedimiento básico¹ a seguir para su correcta ejecución. Además presenta los cálculos efectuados del caso tipo desarrollado con el fin de verificar los resultados obtenidos con la herramienta y comprobar el correcto funcionamiento e instalación de la misma.

4.1. Interfaz gráfica

A continuación se presentan las diferentes pestañas que conforman la interfaz gráfica diseñada; así como una breve explicación de cada una de ella, sus funciones y el orden en el cual deben ir siendo ejecutadas para la correcta selección de los diversos componentes del sistema de bombeo electrosumergible.

¹Para más información sobre el manejo de la herramienta software, se recomienda ver el Anexo D del presente libro donde se encuentra el manual del usuario de la herramienta desarrollada.

BES_UIS
 Archivo Terminar Instalación Ayuda

Presentación **Bombeo** Motor Transformador Cable Simulación

Datos de entrada

DATOS DEL POZO

| | |
|--------------------|------------------|
| O.D. Casing [in] | Profundidad [ft] |
| 7 | 5200 |
| Perforaciones [ft] | O.D. Tubing [in] |
| 5300 | 2.875 |

Tubing: Nuevo Viejo

DATOS DE PRODUCCION

| | | |
|--|---------------------|------------------|
| Pres. Tubing [psi] | T. Prueba [BPD] | PMP [ft] |
| 150 | 900 | 5350 |
| Pres. Prueba [psi] | Pres. F. Pozo [psi] | Produccion [BPD] |
| 985 | 1650 | 2000 |
| Gas-Acette | Corte de Agua % | Temperatura [°F] |
| 50 | 90 | 150 |
| Pres de Punto de burbuja del gas [psi] | | |
| 0 | | |

CONDICIONES DEL FLUIDO DEL POZO

| | |
|-------------------|---------------------|
| Gravedad del Agua | Gravedad del Aceite |
| 1.02 | 0.876 |
| Gravedad del Gas | 30 |
| 0 | |

FUENTE DE ENERGIA

| | |
|----------|--------|
| Vred [V] | f [Hz] |
| 13800 | 60 |

Resultados

| | | | | |
|--------------------------|--------------------------------|-----------------------------|------------------------------|----------------------------|
| Temp. de Operación [°F] | Pres. Máx. Cabeza [psi] | Imin del Conductor [A] | Cal. del Conductor [AWG] | Ejecutar |
| 155 | 2628 | 62.1 | | |
| Per. Fricción [ft] | Pres. lim. de la carcaza [psi] | Vel. Real del Fluido [ft/s] | Per. en el Cable [V/1000 ft] | Shom. del Variador [kVA] |
| 31 | 4970 | 1.91 | | |
| N° Etp de la Bomba | % de carga del eje | Etf de la Bomba % | Factor de corrección. | % de Carga del Controlador |
| 112 | 29.9824 | 70 | | |
| Pot. Bomba [HP] | % de la carga del Fluido | Vnom. del Motor [kV] | V Sup. [V] | S Total [kVA] |
| 121 | 52 | 1.415 | | |
| % de carga de la Carcaza | Cabeza T. Máx. [ft] | Inom. del Motor [A] | % Caída de Tensión | Cargar |
| 56.9014 | 6496 | 54 | | |

BOMBA

| | | | | |
|---------------|-------|----------------------------|----------------------------|----------------------|
| Tipo de Bomba | Serie | Pot. lim. de la Bomba [HP] | Cap. de la Cabeza [ft/Etp] | Máx. Cabeza [ft/Etp] |
| GC2200 | 513 | 405 | 49.7 | 58 |

Figura 4.1: Pestaña de Bombeo
Fuente: Autores

4.1.1. Ingreso de los datos del pozo a evaluar

Los datos recopilados del pozo se introducen dentro de la pestaña “Bombeo” en los recuadros activados² de la misma. Como muestra la figura 4.1, se presiona el botón “Ejecutar” ubicado a la derecha de la pestaña. Dando inicio a los cálculos del equipo de extracción del crudo.

4.1.2. Selección bomba y motor

Se despliega la ventana “selección bomba” (ver figura 4.2), donde se hace clic en una de las bombas del recuadro “bombas opcionales” y se escoge la bomba

²Dícese de los recuadros en blanco donde se puede escribir.

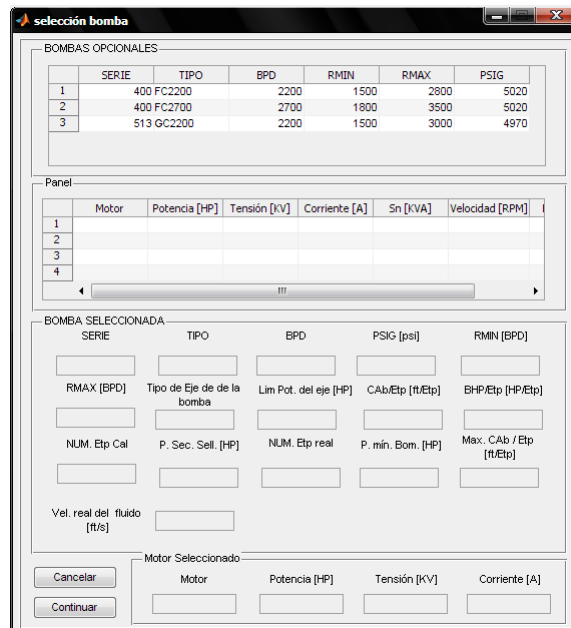


Figura 4.2: Ventana selección bomba
Fuente: Autores

a implementar, teniendo en cuenta lo establecido en la subsección 3.2.5

Posteriormente se incluyen aspectos técnicos específicos de la bomba en los recuadros que van siendo activados de forma progresiva a medida que estos van ingresando. Por último se selecciona el motor que mejor se adapta a las condiciones requeridas de potencia del recuadro panel.

Ya seleccionado el motor y la bomba se procede a oprimir el botón “Continuar” para dar paso a la siguiente etapa del diseño del sistema de bombeo.

4.1.3. Selección variador

Se despliega la ventana “Variadores” (ver figura 4.3), donde se hace clic en una de los variadores del recuadro.

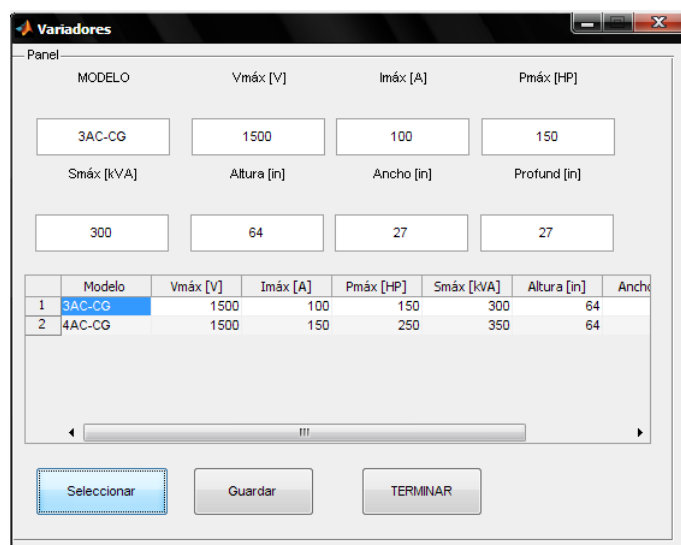


Figura 4.3: Pestaña selección variador.
Fuente: Autores

4.1.4. Selección cable de alimentación del motor.

En la pestaña “Bombeo” se termina de ingresar los datos para el cable de alimentación que cumpla con los requerimientos de corriente para el motor y sus condiciones de trabajo según lo establecido en sección 3.3.

4.1.5. Modelado del motor.

En la pestaña “Motor”, se calcula los parámetros requeridos por el ATP para el modelado del motor de inducción y su posterior simulación. Figura 4.4

4.1.6. Modelado del transformador Elevador

Esta sección se modela el transformador elevador que pueden contener los sistemas B.E.S. con el fin de incrementar el nivel de tensión suministrado por el variador.

La figura 4.5, muestra la pestaña “Transformador Elevador” en la cual se ingresan los parámetros básicos del transformador. Posteriormente se procede a

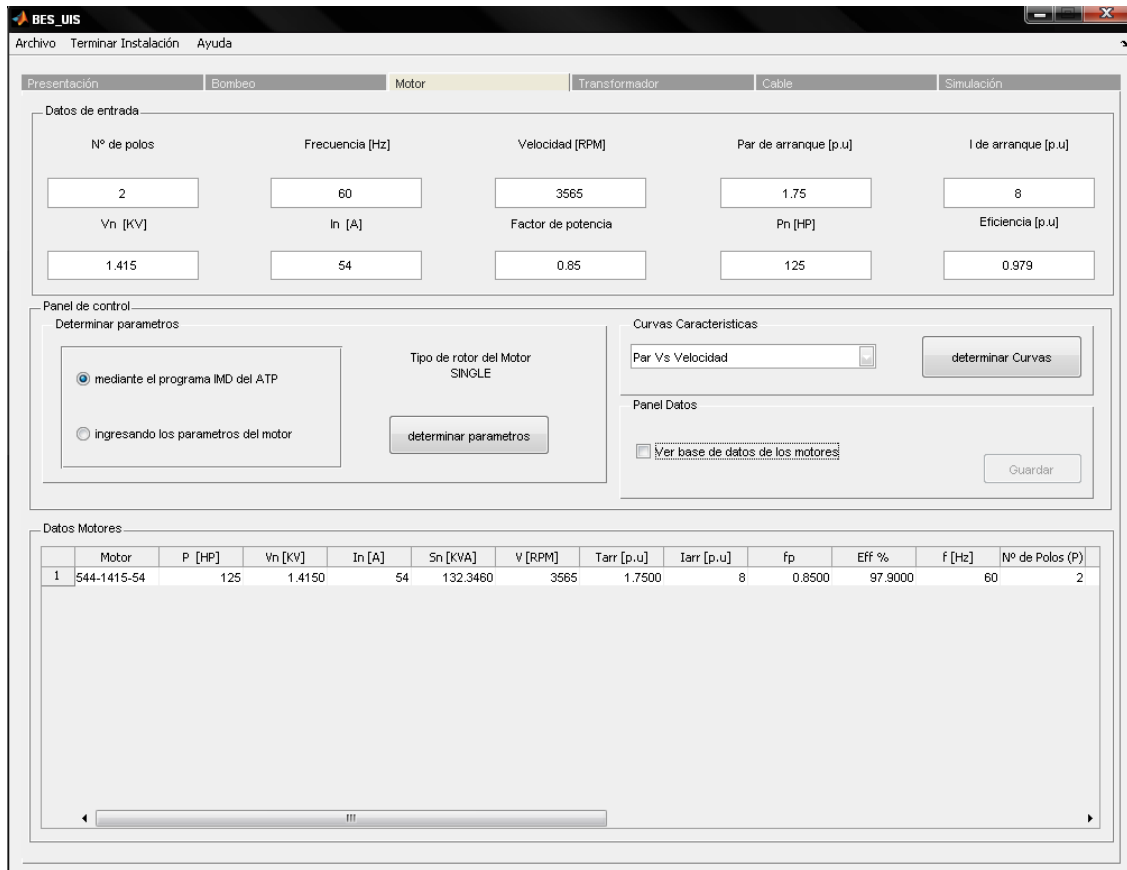


Figura 4.4: Pestaña para el cálculo de los parámetros del motor de inducción.
Fuente: Autores

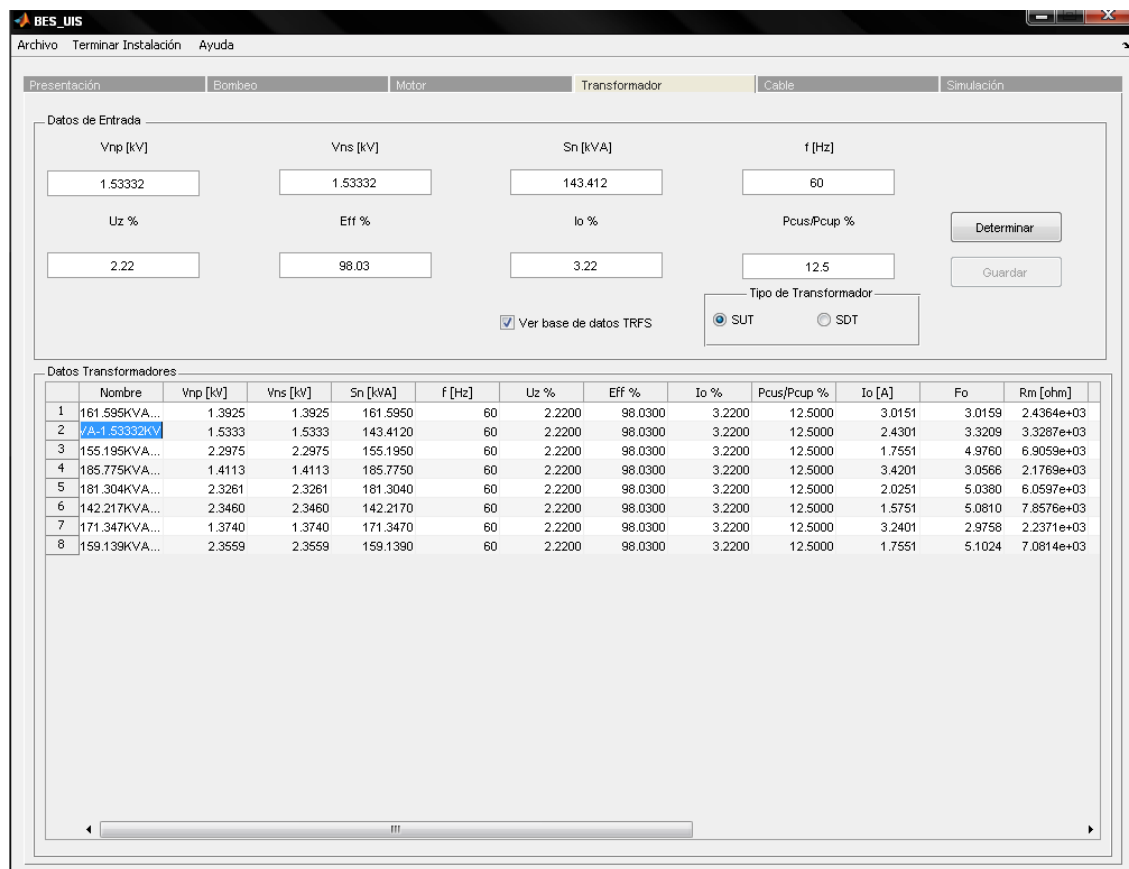


Figura 4.5: Pestaña para el cálculo de los parámetros del transformador.
Fuente: Autores

su modelado dando clic en el botón “determinar” ubicado en la parte superior derecha de la ventana.

4.1.7. Modelado del transformador Reductor

Esta sección se modela el transformador reductor que contiene los sistemas B.E.S. con el fin de disminuir el nivel de tensión suministrado por la fuente.

La figura 4.6, muestra la pestaña “Transformador Reductor” en la cual se ingresan los parámetros básicos del transformador. Posteriormente se procede a su modelado dando clic en el botón “determinar” ubicado en la parte superior derecha de la ventana.

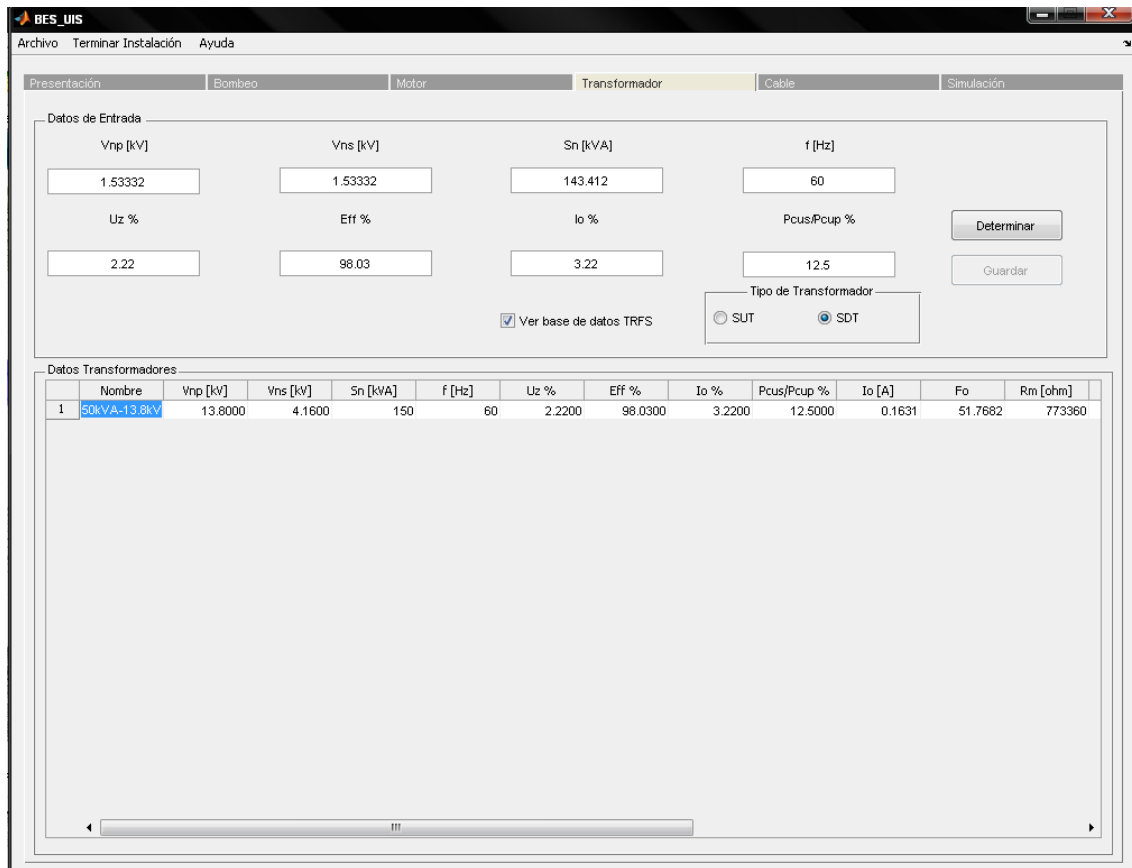


Figura 4.6: Pestaña para el cálculo de los parámetros transformador reductor.
Fuente: Autores

4.1.8. Modelado del cable de alimentación del motor.

El cable de alimentación del motor es el último de los elementos a modelar dentro del presente proyecto en la pestaña "Cable" 4.7, donde se determinan los parámetros requeridos por el ATP para la creación de la librería que modela el cable.

Se comienza escogiendo unos de los cables encontrados en la tabla "Datos cables" en la parte inferior de la ventana, recordando el calibre del cable establecido cuando se seleccionó la bomba. Posteriormente se pulsa el botón "Determinar parámetro" y se continúa haciendo clic en el botón "ATP" para crear la librería que será utilizada por el ATP durante la simulación.

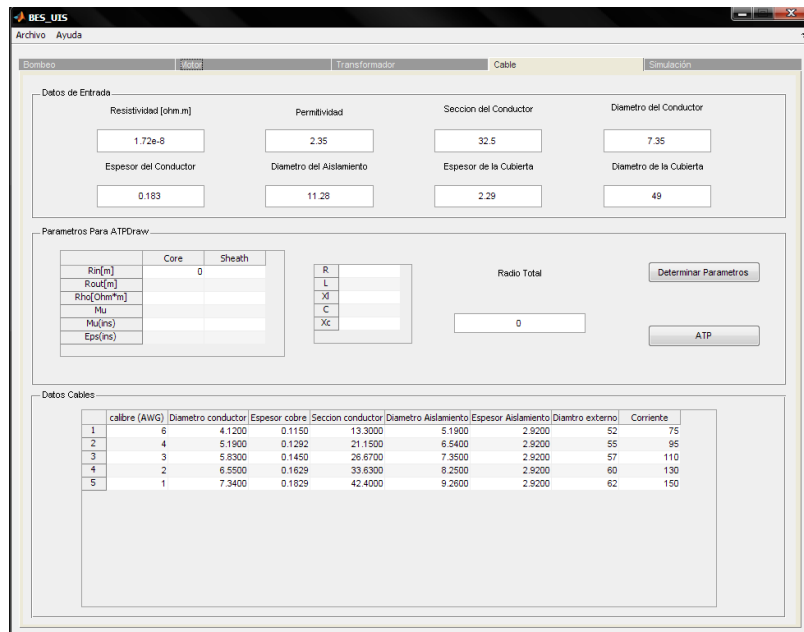


Figura 4.7: Pestaña para la determinación del cable de alimentación del motor.
Fuente: Autores

4.2. Diseño del sistema de bombeo electrosumergible.

La presente sección desarrolla un caso tipo, con el fin de brindar al usuario una referencia en el manejo de la herramienta y verificar el correcto funcionamiento de la misma[1].

En la figura 4.8 se muestra el diagrama conceptual del funcionamiento de la herramienta software.

4.2.1. Recopilación de datos.

Los datos mínimos requeridos para el uso de la herramienta software son los siguientes:

1. Datos de pozo

O.D Casing = 7 Pulgadas (0,1778 m)

O.D. Tubing = 2 7/8 Pulgadas (113,19 m) Nuevo

Perforaciones = 5300 - 5400 Pies (1615,44 - 1645,92 m)

Profundidad de asentamiento de la bomba = 5200 Pies (1584,96 m)

2. Datos de producción

Presión de cabeza en tubing = 150 PSIG

Tasa de prueba = 900 BPD

Punto medio de perforaciones = 5350 Pies (1630,68 m)

Presión de prueba = 985 PSIG

Presión estática de fondo de pozo = 1650 PSIG

Temperatura de fondo de pozo = 150 °F (65,56 °C)

Relación gas- aceite = 50 Scf/stb

Corte de agua = 90 %

Tasa de producción deseada = 2000 BPD

3. Condiciones del fluido del pozo

Gravedad específica del agua = 1,02

Gravedad A.P.I del aceite = 30 (0,876)

1. Fuente de energía eléctrica

Tensión primaria disponible 7967/13800 V ³

Frecuencia = 60 Hz

Ya obtenida la información básica de las condiciones del pozo, se procede a introducirla en la pestaña "Bombeo" de la ventana principal de la herramienta software como se muestra en la figura D.2 contenida en el manual del usuario del apéndice D.

³Donde 7967 hace referencia a la tensión eficaz de fase y 13800 hace referencia a la tensión eficaz de línea.

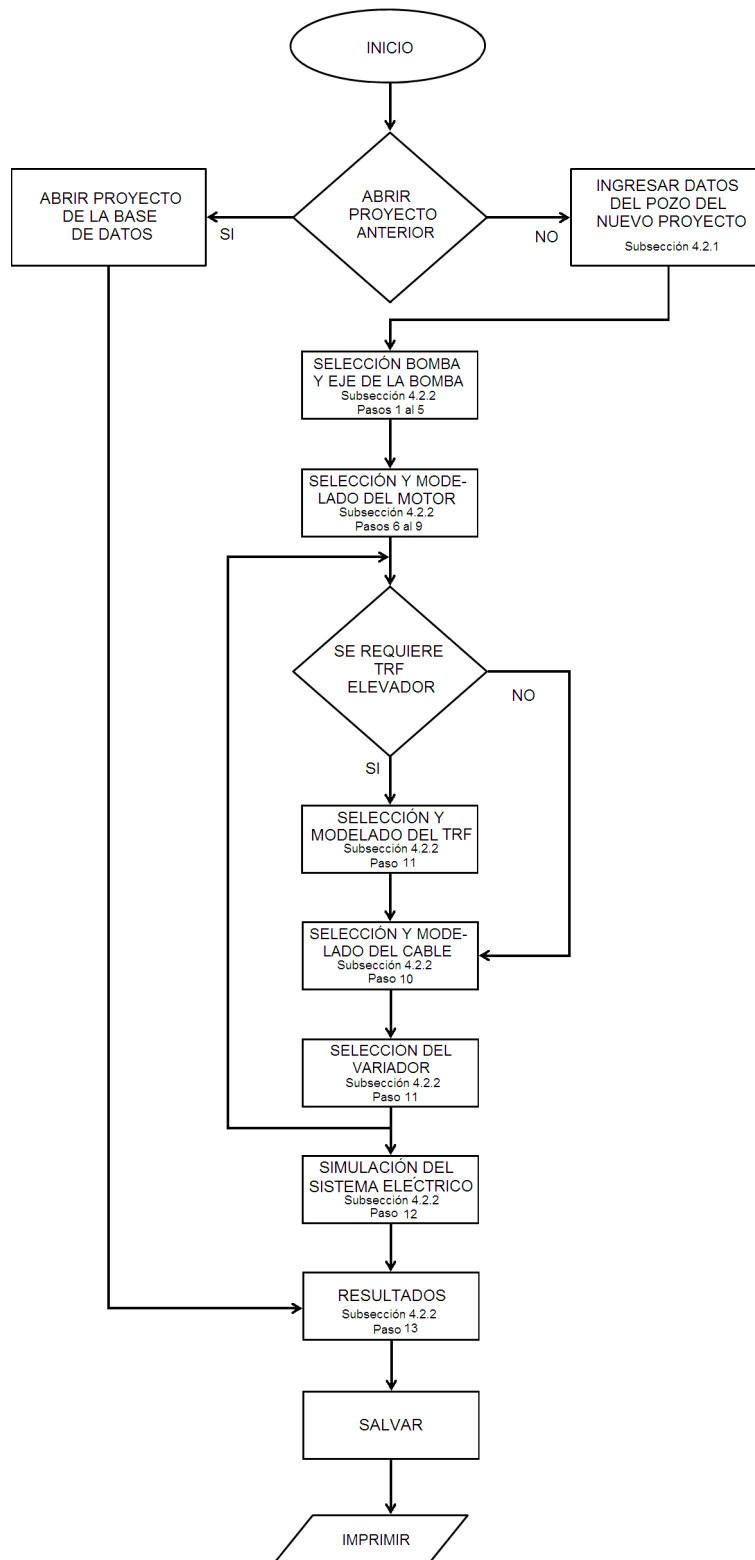


Figura 4.8: Diagrama conceptual del funcionamiento de la herramienta software
Fuente: Autores

| Serie | Tipo | BPD | Rmin | Rmax | PSIG |
|-------|--------|------|------|------|------|
| 400 | FC2200 | 2200 | 1500 | 2800 | 5020 |
| 400 | FC2700 | 2700 | 1800 | 3500 | 5020 |
| 513 | GC2200 | 2200 | 1500 | 3000 | 4970 |

Cuadro 4.1: Bombas seleccionadas por la herramienta software que pueden ser implementadas para el sistema.

Fuente: Autores

4.2.2. Ejecución de la herramienta software.

Una vez ingresados los datos del pozo en la pestaña “Bombeo” se procede a ejecutar los cálculos para la determinación de la bomba y el motor a implementar.

A continuación se enumeran una serie de pasos a considerar y una serie de datos a ingresar dentro de la ventana “Selección Bomba” y la pestaña “Bombeo”, con el fin de que la herramienta software realice los cálculos tipo presentados y obtener el requerimiento de potencia necesario para el motor.

Como el corte de agua para este caso es alto, cerca del 90 %. Se puede anticipar que no se presentara problemas de emulsión.

1. Determinación de la serie de la bomba

Se determina la serie de la bomba teniendo en cuenta la tasa de producción deseada y que tan cercano está su funcionamiento al punto de mejor eficiencia a la frecuencia de trabajo.

(Como se verá más adelante con mayor detalle en el numeral 5, la bomba que mejor cumple los requerimientos necesarios para este sistema es la bomba serie 513 GC2200.)

2. Límite de potencia del eje

Con ayuda de la serie de la bomba seleccionada, el tipo de eje y con el valor de la frecuencia de operación, se lee la potencia límite del eje de la bomba, de las curvas de potencia límite del eje de la bomba HP contra la frecuencia Hz. Que para el ejemplo citado en el presente trabajo se puede encontrar en la Figura B.3 del Anexo B. Luego se determina el porcentaje de carga como se muestra en la ecuación (4.1)

$$\%Carga = \left(\frac{HP \text{ Bomba Requerida}}{HP \text{ Límite del eje de la Bomba}} \right) * 100 \quad (4.1)$$

Bomba serie: 513

Tipo de eje: Intermedio

Potencia requerida del eje de la bomba: 118,8 HP

Potencia límite del eje de la bomba: 405 HP tomado de la figura B.3

$$\%Carga = \left(\frac{118,8 \text{ HP}}{405 \text{ HP}} \right) * 100 = 29,3 \%$$

3. Determinación de la presión de entrada a la bomba

La determinación de la presión de entrada a la bomba está dada por la ecuación (4.2)

$$IP = \frac{Q}{(P_R - P_{wf})} \quad (4.2)$$

Dónde:

Q = Tasa de flujo BPD

P_R = Presión estática del yacimiento PSI

P_{wf} = Presión del flujo del pozo a la tasa Q PSI

$$IP = \frac{900 \text{ BPD}}{(1650 \text{ PSI} - 985 \text{ PSI})} = 1,353 \text{ BPD/PSI}$$

La nueva presión de flujo P_{wf} a la tasa deseada Q_d está dada por la ecuación (4.3)

$$P_{wf} = P_R - \left(\frac{Q_d}{IP} \right) \quad (4.3)$$

$$P_{wf} = 1650 \text{ PSI} - \left(\frac{2000 \text{ BPD}}{1,353 \text{ BPD/PSI}} \right) = 172 \text{ PSI}$$

La presión de entrada a la bomba se determina corrigiendo la presión del flujo por la diferencia entre la profundidad de asentamiento de la bomba, el punto medio de perforaciones y considerando las pérdidas por fricción en el anular del casing.

Para el ejemplo, la bomba está ubicada justo arriba de las perforaciones. Las pérdidas por fricción debido al flujo del fluido a través del anular desde las perforaciones hasta la profundidad de asentamiento de la bomba será pequeño comparado con la presión del flujo y se puede despreciar.

Debido a que hay tanta agua como aceite en el fluido producido, es necesario calcular la gravedad específica compuesta de los fluidos producidos. Donde la gravedad específica del fluido está dada por la ecuación (4.4)

$$\gamma_{liq} = (Gravedad\ Agua * Corte\ Agua) + (Gravedad\ Aceite * Corte\ Aceite) \quad (4.4)$$

$$\gamma_{liq} = (1,02 * 0,9) + (0,876 * 0,1) = 1,01$$

La presión debido a la diferencia en la profundidad de las perforaciones (5350 Pies o 1630,68 m) y la profundidad de asentamiento de la bomba (5200 Pies o 1584,96 m) es 150 Pies (45,72 m).

Para convertir a PSI, se encuentra determinado a través de la ecuación (4.5)

$$PSI = \frac{(Cabeza\ Pies * Gravedad\ Específica)}{2,31\ Pies/PSI} \quad (4.5)$$

$$PSI = \frac{(150\ Pies * 1,01)}{2,31\ Pies/PSI} = 66\ PSI$$

Por tanto la presión de entrada de la bomba

$$P.I.P = (172\ PSI - 66\ PSI) = 106\ PSI$$

4. Cabeza dinámica total:

Es igual al levantamiento dinámico neto más las pérdidas por fricción más la presión de cabeza de tubing.

P.M.P = Punto medio de perforaciones (Pies)

$$LNV = 5350 \text{ Pies} - \left(\frac{172 \text{ PSI} * 2,31 \text{ Pies/PSI}}{1,01} \right) = 4960 \text{ Pies} \quad (4.6)$$

las pérdidas por fricción se obtiene de la figura B.1. Usando un tubing nuevo de 2 7/8 Pulgadas a 2000 BPD será de 31/1000 y las pérdidas por fricción total se pueden determinar mediante la expresión dada por la ecuación (4.7):

$$Pérdidas_{Fricción \text{ Total}} = Pérdidas_{Fricción \text{ Tubing}} * Profundidad_{Asentamiento \text{ Bomba}} \quad (4.7)$$

$$Pérdidas_{Fricción \text{ Total}} = \left(\frac{31}{1000} \right) * 5200 \text{ Pies} = 161 \text{ Pies}$$

la presión requerida en la cabeza del tubing (P_d) es 150 PSI convirtiéndola a cabeza en Pies, se calcula cómo muestra la ecuación (4.8):

$$Cabeza(\text{Pies}) = \frac{PSI * 2,31 \text{ Pies/PSI}}{Gravedad \text{ Específica}} \quad (4.8)$$

$$Cabeza(\text{Pies}) = \frac{(150 \text{ PSI} * 2,31 \text{ Pies/PSI})}{1,01} = 343 \text{ Pies}$$

Para el cálculo la cabeza dinámica total se emplea la ecuación (4.9)

$$TDH = H_d + F_t + P_d \quad (4.9)$$

$$TDH = 4960 \text{ Pies} + 161 \text{ Pies} + 343 \text{ Pies} = 5464 \text{ Pies}$$

5. Tipo de bomba

Refiriéndose a la tabla C.9. Datos de selección de la bomba, se puede determinar que para el tipo de la bomba GC-2200, la tasa de producción deseada cae dentro del rango de capacidad necesitada y está cercano al punto de mejor eficiencia (B.E.P.). Sobre la curva de comportamiento para la bomba GC-2200 a 60 Hz se determina la cabeza/etapa y el BHP/etapa a la tasa de producción deseada de 2000 BPD estos datos se obtiene de la figura ⁴ B.2

$$Cabeza/Etapa\ 2000 = 49,7\ Pies/Etapa$$

$$BHP/Etapa\ 2000 = 1,05\ BHP/Etapa$$

Ahora se puede determinar el número de etapas requeridas por la bomba para la aplicación y se calcula como muestra la ecuación (4.10).

$$Número\ de\ Etapas = \frac{TDH}{Cabeza/Etapa} \quad (4.10)$$

$$Número\ de\ Etapas = \frac{5464\ Pies}{49,7\ Pies/Etapa} = 110\ Etapas$$

Una vez determinado el número de etapas, se miran los datos suministrados por los fabricantes de bombas y se busca una con igual número de etapas o superior más cercano, que cumpla los criterios de selección mencionados en la sección 3.2.5.

Se observa en la tabla C.1 que se dispone de una bomba de 112 etapas. Como solamente se requieren 110 etapas, la bomba de 112 etapas tendera a producir ligeramente un poco más de la tasa de producción deseada. Para este ejemplo se selecciona una bomba estándar GC-2200 de 112 etapas.

⁴La Cabeza/Etapa se lee sobre la curva de capacidad de la cabeza, mientras que el BHP/Etapa se lee sobre la curva de potencia del motor

| Nombre | Potencia HP | Tensión kV | Corriente A |
|-------------|-------------|------------|-------------|
| 544-1245-67 | 125 | 1,2450 | 67 |
| 544-1415-54 | 125 | 1,4150 | 54 |
| 544-2150-39 | 125 | 2,1500 | 39 |
| 544-1280-76 | 150 | 1,2800 | 76 |
| 544-2160-45 | 150 | 2,1600 | 45 |
| 562-2145-35 | 130 | 2,1450 | 35 |
| 562-1250-72 | 150 | 1,2500 | 72 |
| 562-2210-39 | 150 | 2,2100 | 39 |

Cuadro 4.2: Motores determinados por la herramienta software que cumplen el requerimiento de potencia

Fuente: Autores

Ya determinado el número de etapas, se calcula la potencia requerida por la bomba (BHP) como se muestra en la ecuación (4.11).

$$BHP \text{ de la bomba} = BHP/Etapa * \text{Número de Etapas} * \text{Gravedad Específica Fluido} \quad (4.11)$$

$$BHP \text{ de la bomba} = 1,05 \text{ HP}/Etapas * 112 \text{ Etapas} * 1,01 = 118,8 \text{ HP}$$

6. Selección de la sección sellante y del motor.

Normalmente la serie de la sección sellante coincide con la serie de la bomba, aunque existen excepciones que requieren adaptadores especiales. Se asume que la sección sellante y la bomba son de la misma serie.

El requerimiento de potencia de la sección sellante depende de la cabeza dinámica total producida por la bomba. La Figura B.13 muestra un requerimiento de 3,17 HP para la sección sellante serie 513 operando contra un TDH de 5464 Pies (1665,43 m) por lo tanto la potencia del motor requerido debe ser igual a los 118,8 HP de la bomba más los 3,17 HP para el sello. Lo cual da como resultado una potencia mínima total para el motor de 121,97 HP.

Los motores que cumplen con el requerimiento de potencia, refiriéndose a la tabla C.2 son:

Donde se observa que se dispone de varios motores de 125 HP. Estos motores, de ser utilizados, estarán por debajo de su carga nominal en aproximadamente un 2 % durante la operación normal. Si se desea seleccionar un motor que este ligeramente sobrecargado, se deben tomar las precauciones necesarias con el fin de que esto no se vea reflejado en una reducción de la vida útil del motor como consecuencia de un incremento en la temperatura de operación del mismo.

Para el ejemplo, se selecciona el motor de la serie 544 cuyos valores de potencia, tensión y corriente respectivamente son: 125 HP, 1415 V y 54 A

7. límites de carga

- Presión de la carcasa

Con la serie de la bomba seleccionada se lee el límite de la presión de la carcasa en la tabla C.5. Luego se determina la máxima cabeza que desarrolla la bomba seleccionada cuando el caudal de producción sea cero.

El porcentaje de carga se determina con las ecuaciones (4.12); (4.13); (4.14)

Bomba serie: 513

Presión límite de la carcasa se obtiene de la tabla C.5 = 4970 PSIG

Máximo Cabeza/Etapa a cero caudal se obtiene de la figura B.2 = 58 Pies/Etapa

$$Cabeza\ Total\ Máxima = Máxima\ cabeza/Etapa * Número\ de\ Etapas \quad (4.12)$$

$$Cabeza\ Total\ Máxima = 58\ Pies/Etapas * 112\ Etapas = 6496\ Pies$$

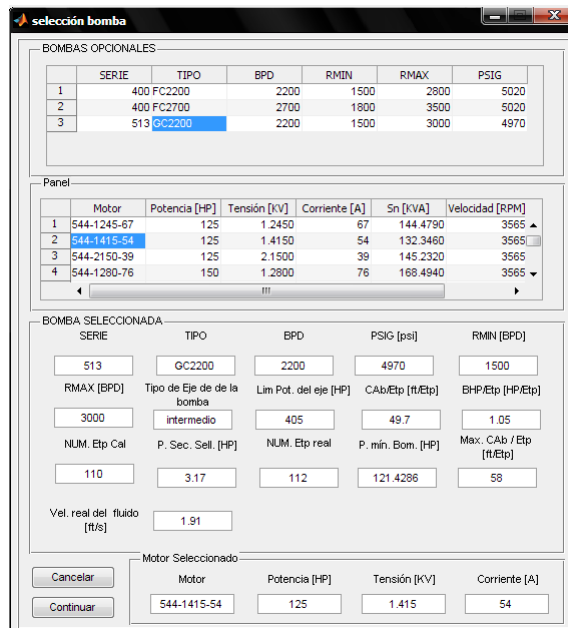


Figura 4.9: Ventana Selección Bomba
Fuente: Autores

$$Presión\ Máxima\ Carcasa = \frac{Cabeza\ Total\ Máxima * \gamma_{liq}}{2,31\ Pies/PSI} \quad (4.13)$$

$$Presión\ Máxima\ Carcasa = \frac{6496\ Pies * 1,01}{2,31\ Pies/PSI} = 2812,12\ PSIG$$

$$\%Carga = \frac{Presión\ Máxima\ Carcasa}{Presión\ Límite\ Carcasa} * 100 \quad (4.14)$$

$$\%Carga = \frac{2812,12\ PSIG}{4970\ PSIG} * 100 = 56,58\ %$$

8. Determinación de la carga de la bomba

Con el diámetro externo del casing, la serie del motor seleccionado y el caudal de producción deseado, se determina la velocidad del fluido que pasa por el motor figura B.4:

Diámetro externo del casing = 7 Pulg

Motor serie = 544

Caudal de producción deseada = 2000 BPD

Velocidad del fluido pasado por el motor = 1,91 Pies/s

El porcentaje de carga se calcula con la ecuación (4.15)

$$\%Carga = \frac{Velocidad\ Fluido\ recomendada}{Velocidad\ Fluido\ Real} * 100 \quad (4.15)$$

$$\%Carga = \frac{1\text{Pie/s}}{1,91\text{Pie/s}} * 100 = 52,36\%$$

9. Determinación de la eficiencia de la bomba

La potencia hidráulica de salida HP que desarrolla la bomba se puede calcular con la ecuación (4.16)

$$\%Eff = \left(\frac{Q * H * \gamma_{liq}}{BHP * 13600} \right) * 100 \quad (4.16)$$

$$\%Eff = \frac{(2000\text{ BPD} * 49,7\text{Pies/Etapas} * 1,01)}{(1,05\text{HP/Etapas} * 13600)} * 100 = 70,3\%$$

10. Determinación de la temperatura ambiente de operación y cable de potencia

La corriente mínima que debe soportar el conductor es:

$$I_{conductor} = F_M \times I_{Nominal\ motor\ máx} \quad (4.17)$$

$$I_{conductor} = 1,15 \times 54\text{ A} = 62,1\text{ A}$$

La temperatura de operación es la suma de la temperatura del pozo más el incremento de temperatura debido a las pérdidas en la bomba y el motor.

BES_UIS

Archivo Terminar Instalación Ayuda

Presentación **Bombeo** Motor Transformador Cable Simulación

Datos de entrada

| | | | | | | |
|--|------------------|--|---------------------|------------------|---------------------------------|---------------------|
| DATOS DEL POZO | | DATOS DE PRODUCCION | | | CONDICIONES DEL FLUIDO DEL POZO | |
| O.D. Casing [in] | Profundidad [ft] | Pres. Tubing [psi] | T. Prueba [BPD] | PMP [ft] | Gravedad del Agua | Gravedad del Aceite |
| 7 | 5200 | 150 | 900 | 5350 | 1.02 | 0.876 30 |
| Perforaciones [ft] | O.D. Tubing [in] | Pres. Prueba [psi] | Pres. F. Pozo [psi] | Produccion [BPD] | Gravedad del Gas | |
| 5300 | 2.875 | 985 | 1650 | 2000 | 0 | |
| Tubing | | Gas-Aceite | Corte de Agua % | Temperatura [°F] | FUENTE DE ENERGIA | |
| <input checked="" type="radio"/> Nuevo <input type="radio"/> Viejo | | 50 | 90 | 150 | Vred [V] | 1 [Hz] |
| | | Pres de Punto de burbuja del gas [psi] | | | 13800 | 60 |
| | | 0 | | | | |

Resultados

| | | | | |
|--------------------------|--------------------------------|-----------------------------|------------------------------|----------------------------|
| Temp. de Operación [°F] | Pres. Máx. Cabeza [psi] | Imin del Conductor [A] | Cal. del Conductor [AWG] | Ejecutar |
| 155 | 2828 | 62.1 | | |
| Per. Fricción [ft] | Pres. lim. de la carcasa [psi] | Vel. Real del Fluido [ft/s] | Per. en el Cable [V/1000 ft] | Snom. del Variador [kVA] |
| 31 | 4970 | 1.91 | | |
| Nº Etp de la Bomba | % de carga del eje | Eff de la Bomba % | Factor de corrección. | % de Carga del Controlador |
| 112 | 29.9824 | 70 | | |
| Pot. Bomba [HP] | % de la carga del Fluido | Vnom. del Motor [kV] | V Sup. [V] | S Total [kVA] |
| 121 | 52 | 1.415 | | |
| % de carga de la Carcasa | Cabeza T. Máx. [ft] | Inom. del Motor [A] | % Caída de Tensión | Cargar |
| 56.9014 | 6496 | 54 | | |

BOMBA

| | | | | |
|---------------|-------|----------------------------|----------------------------|----------------------|
| Tipo de Bomba | Serie | Pot. lim. de la Bomba [HP] | Cap. de la Cabeza [ft/Etp] | Máx. Cabeza [ft/Etp] |
| GC2200 | 513 | 405 | 49.7 | 58 |

Figura 4.10: Pestaña Bombeo esperando los datos necesarios para la determinación del variador

Fuente: Autores

La temperatura debido a las pérdidas en la bomba y el motor se calcula con las ecuaciones (4.18); (4.19).

$$C_M = \text{Fracción de agua} \times C_w + \text{Fracción de Aceite} \times C_o \quad (4.18)$$

$$\nabla T = \left(\frac{TDH}{777 * C_M} \right) \times \left(\frac{1}{EP * EM} - 1 \right) \quad (4.19)$$

Dónde

C_M = Calor específico de la mezcla

EP = Eficiencia de la bomba

EM=Eficiencia del motor

C_o = Calor específico del aceite

C_w = Calor específico del agua

$$C_M = 0,9 * 1,0 + 0,1 * 0,5 = 0,95$$

$$\Delta T = \left(\frac{5464}{777 * 0,95} \right) * \left(\frac{1}{0,703 * 0,83} - 1 \right) = 6^\circ F$$

$$\Delta T = 6^\circ F + 150^\circ F = 156^\circ F \text{ o } 68,90^\circ C$$

Según la tabla C.11 de corriente máxima permisible para los conductores, los calibres mayores e iguales al N° 6 AWG soportan la corriente de 62,1 A. Aplicando la ecuación (4.20) para corregir la capacidad de corriente del conductor N° 6 AWG por condiciones de temperatura, se obtiene una corriente de:

$$I_{conductor} = F_{\text{corrección por temperatura}} \times I_{\text{tablas}} A \quad (4.20)$$

$$I_{conductor} = 0,58 \times 75 A = 43,5 A$$

Se observa que el calibre N° 6 AWG no cumple con los requerimientos de trabajo. A continuación se despeja de la ecuación (4.20) el valor de la corriente a soportar para una temperatura de trabajo de 30 °C:

$$I_{tablas} = \frac{I_{conductor} A}{F_{corrección\ por\ temperatura}} = \frac{62,1 A}{0,58} = 107,069 A$$

Para esta corriente cumplen los conductores a partir del calibre N° 3 AWG. Revisando la figura B.5 provista por los fabricantes. El Calibre N° 3 no se encuentra contemplado, Se escoge el calibre siguiente por encima en capacidad de corriente.

El cable N° 2 AWG, tiene una caída de tensión de 15,8 V/1000 Pies a 20 °C ó 68 °F. Se debe corregir la caída de tensión a la temperatura ambiente de operación de 156 °F y adicionando 200 Pies de cable para las conexiones en superficie.

Factor de corrección para la caída de tensión por temperatura 156 °F ó 68,90 °C = 1,192

$$Caída\ de\ Tensión = Caída\ Tensión\ a\ 68°F\ ó\ (20\ °C) * Factor\ Corrección \quad (4.21)$$

$$Caída\ de\ Tensión = (15,8\ V/1000\ Pies) * 1,192 = 18,8\ V/1000\ Pies$$

$$Caída\ Tensión\ Total = \left(\frac{Caída\ de\ Tension \times Perforación}{1000Pies} \right) \quad (4.22)$$

$$Caída\ Tensión\ Total = \left(\frac{18,8\ V \times 5350\ Pies}{1000\ Pies} \right) = 100,6\ V$$

Ahora se puede determinar la tensión requerida en la superficie, la cual es igual a la tensión nominal del motor más la caída de tensión del cable y se calcula con las siguientes ecuaciones. Tensión en la superficie (4.23)

$$\text{Tensión Superficie} = (V_{\text{Motor de Fase}} + \text{Caída Total Cable}) \quad (4.23)$$

$$\text{Tensión Superficie} = (1415V + 100,6V) = 1515,6 V$$

el porcentaje de caída total de tensión se calcula con la ecuación (4.24)

$$\text{Caída Tensión Total} = \left(\frac{\text{Caída Tensión Total Cable}}{\text{Tensión Superficie}} \right) \quad (4.24)$$

$$\text{Caída Tensión Total} = \left(\frac{(1515,6 V - 1415 V)}{1515,6 V} \right) * 100 = 6,64 \%$$

Como se puede observar, el porcentaje de caída de tensión total es menor del 20 %, lo cual indica que el tamaño del cable seleccionado es correcto y además el motor no presentara problemas en el momento del arranque.

11. Potencia total del sistema

La potencia total del sistema se calcula con la siguiente ecuación (4.25)

$$|S| = \left(\frac{\sqrt{3} \times \text{Tensión Superficie} \times \text{Corriente Motor}}{1000} \right) \text{kVA} \quad (4.25)$$

$$|S| = \left(\frac{\sqrt{3} \times 1515,6 V \times 54 A}{1000} \right) = 141,75 \text{kVA}$$

El tipo de transformador a seleccionar, depende de la tensión del suministro de potencia disponible, tensión en superficie requerida y el rango de kVA refiriéndose a las especificaciones de los transformadores de la tabla C.4. Se usan tres transformadores monofásicos (tipo 125, cada uno de 50 kVA, Tensión primaria 7967/13800 V, Tensión secundaria 480/1920 V).

La selección del variador del motor se basa en la tensión en la superficie y corriente del motor, así como el rango en kVA totales del sistema. Refi-

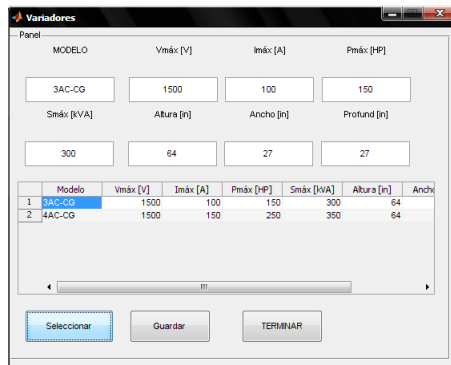


Figura 4.11: Pestaña selección variador.
Fuente: Autores

riéndose a las especificaciones del variador en la tabla C.7, se selecciona el variador 3AC-CG (1500 V, 150 A, 300 kVA), para este caso.

Ahora se determina el porcentaje de carga del variador con la siguiente ecuación (4.26)

$$\% S = \left(\frac{|S|_{\text{Requerido en superficie}}}{|S|_{\text{Nominal}}} \right) * 100 \quad (4.26)$$

$$\% S = \left(\frac{141,75 \text{ kVA}}{300 \text{ kVA}} \right) * 100 = 47,25 \%$$

12. Simulación del sistema cable-motor.

Haciendo referencia a lo indicado en la sección anterior o como se indica en el apéndice D Manual del usuario. Se procede a:

- Se modela el motor, transformador y cable de alimentación, con ayuda de la herramienta software en sus respectivas pestañas.
- Se selecciona la pestaña “Simulación” de la herramienta donde:
 - Se ingresan los valores deseados para el delta de tiempo (dt), el tiempo de simulación, frecuencia y deslizamiento inicial del motor para la simulación.
 - Se seleccionan los resultados que se desean visualizar tales como: corrientes, tensiones, velocidad y par entre otros.

- Se ejecuta la simulación.

13. Visualización de los resultados

Esta visualización de resultados forma parte de la metodología implementada y se realiza como se verá en el capítulo siguiente, con el fin hacer una retroalimentación y ajustar la selección de los elementos eléctricos⁵.

⁵Ver el manual del usuario subsección D.3.8

Capítulo 5

ANÁLISIS Y RESULTADOS

Introducción

Con el fin de mostrar la validez y beneficios obtenidos al complementar la metodología implementada por los ingenieros de petróleo. Este capítulo presenta el análisis de los resultados considerados importantes al momento de seleccionar el motor y el cable de alimentación del motor implementados en los sistemas B.E.S.

5.1. Tensiones de superficie

5.2. Arranque del motor

Se observa un pico de corriente inicial de aproximadamente 500 A el cual desaparece en medio ciclo, dando paso a la corriente de arranque del motor cuyo pico se encuentra cercano a los 400 A y una caída de tensión en bornes del motor que tienen una duración de alrededor de 2,5 sg como muestran las figuras 5.7 y 5.10 respectivamente. Para luego estabilizarse la corriente a unos 70 A pico y la tensión a un valor que oscila alrededor de los 1,5 kV pico como muestra la figura 5.13.

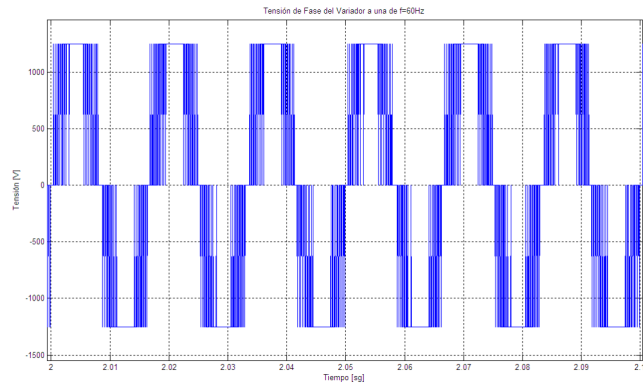


Figura 5.1: Tensión de fase del variador a 60Hz.
Fuente: Autores

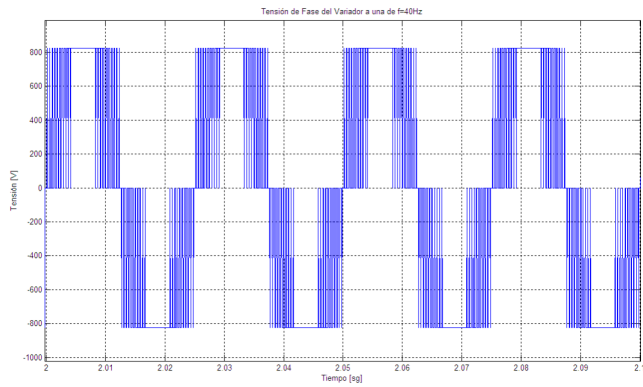


Figura 5.2: Tensión de fase del variador a 40Hz.
Fuente: Autores

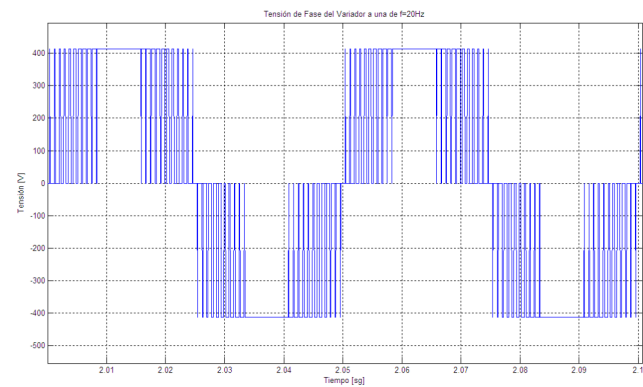


Figura 5.3: Tensión de fase del variador a 20Hz.
Fuente: Autores

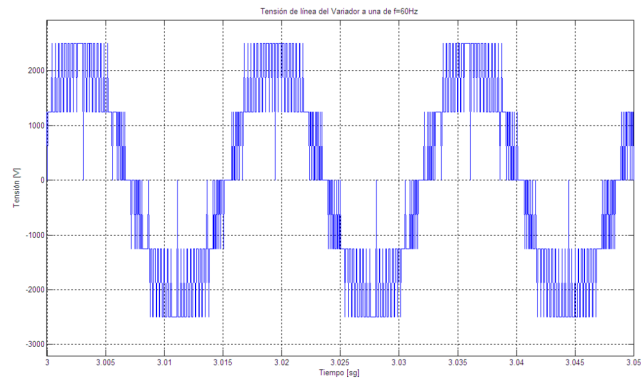


Figura 5.4: Tensión de línea del variador a 60Hz
Fuente: Autores

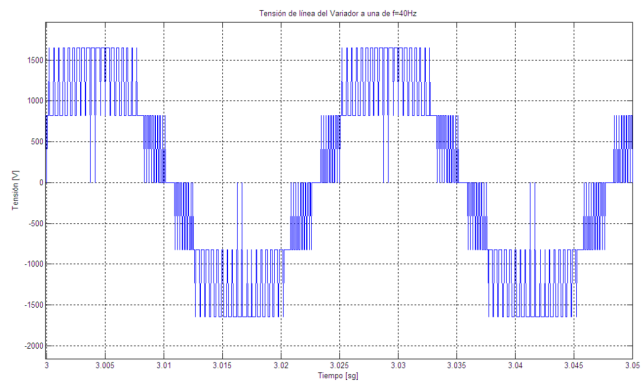


Figura 5.5: Tensión de línea del variador a 40Hz
Fuente: Autores

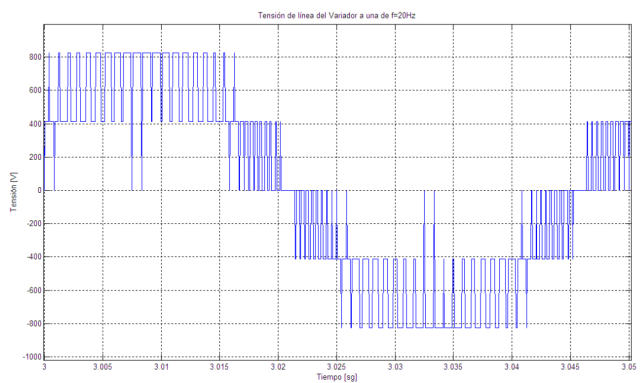


Figura 5.6: Tensión de línea del variador a 20Hz
Fuente: Autores

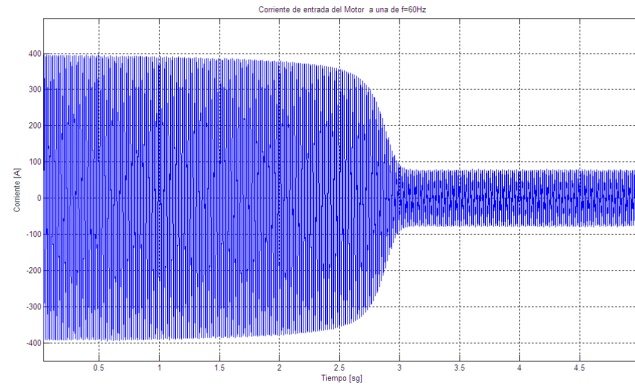


Figura 5.7: Corriente de entrada del motor a 60Hz.
Fuente: Autores

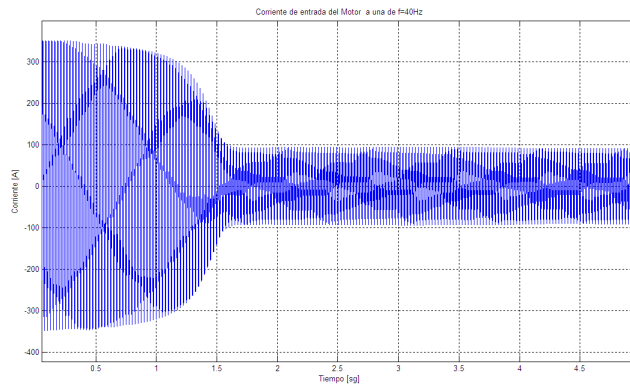


Figura 5.8: Corriente de entrada del motor a 40Hz.
Fuente: Autores

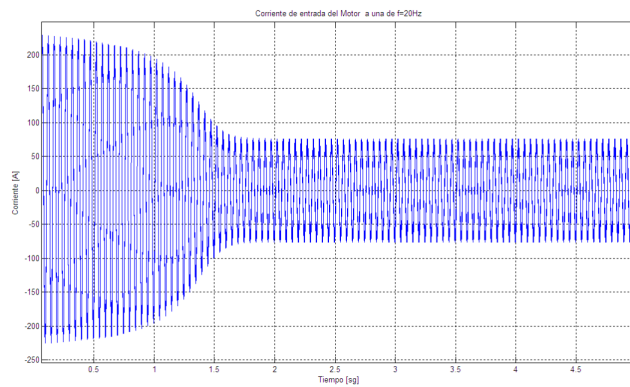


Figura 5.9: Corriente de entrada del motor a 20Hz.
Fuente: Autores

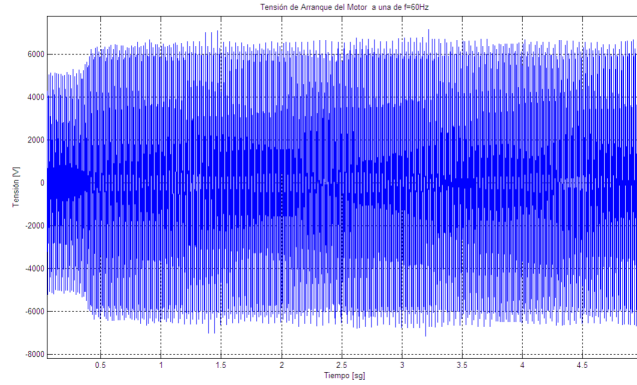


Figura 5.10: Tensión en bornes del motor a 60Hz
Fuente: Autores

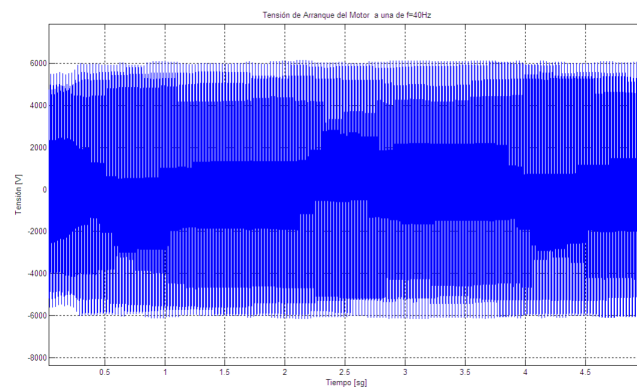


Figura 5.11: Tensión en bornes del motor a 40Hz
Fuente: Autores

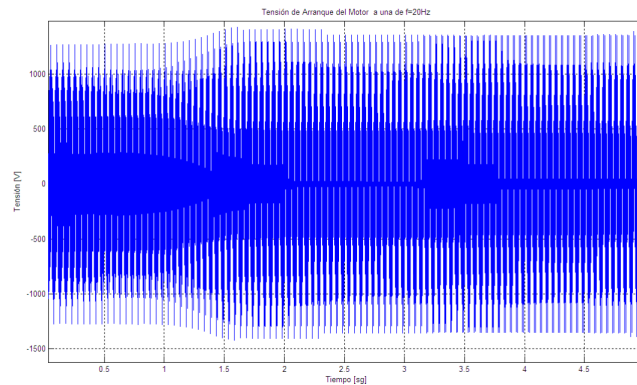


Figura 5.12: Tensión en bornes del motor a 20Hz
Fuente: Autores

- La corriente pico de arranque del motor es de aproximadamente 400 A ó del 524 % de la corriente nominal del motor.
- Los tiempos de duración de la corriente y tensión de arranque; deben ser considerados al momento de determinar los tiempos de accionamiento de los elementos de protección así como la capacidad del conductor a soportar estos incrementos de corriente durante el tiempo que dura el arranque de los motores.

5.3. Estado estable

- La tensión del motor está levemente por encima de su valor nominal por causa de los efectos capacitivos a lo largo del cable de alimentación. Lo cual hace necesario la corrección de estos efectos mediante la implementación de filtros o compensación de los mismos.

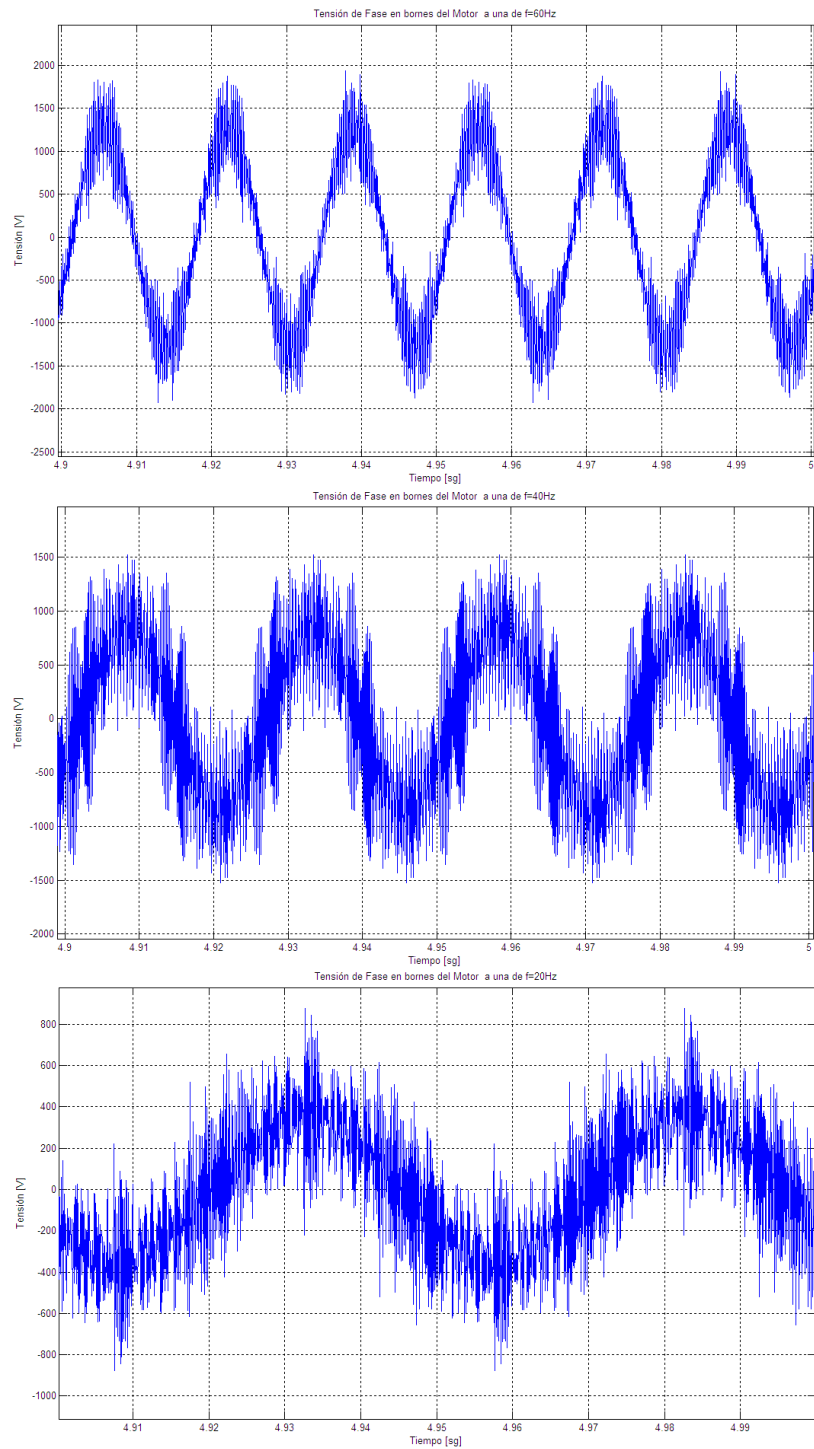


Figura 5.13: tensiones de fase en estado estable.
Fuente: Autores

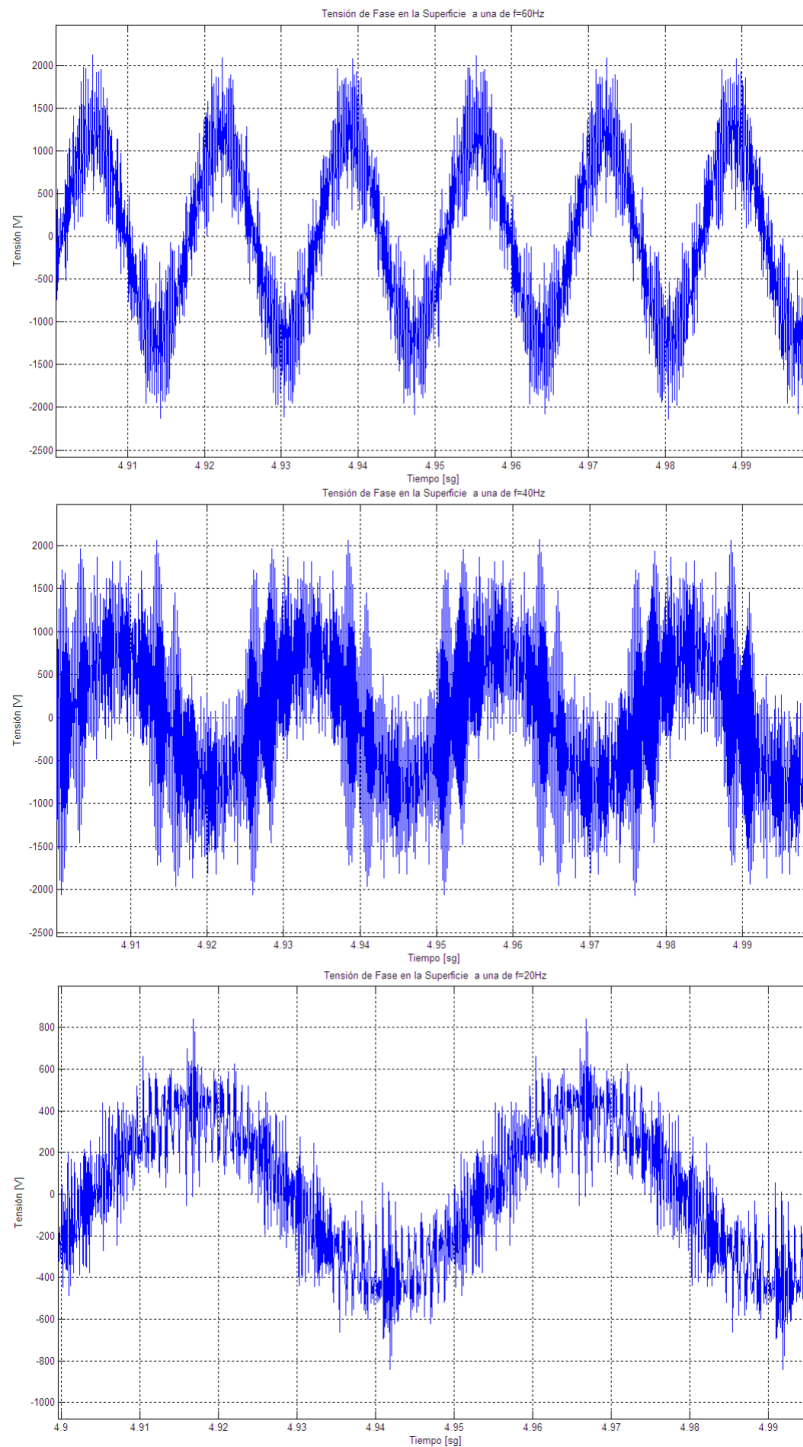


Figura 5.14: tensiones de fase en estado estable.
Fuente: Autores

Capítulo 6

CONCLUSIONES Y DESARROLLOS FUTUROS

6.1. Conclusiones

- La literatura encontrada, muestra que la metodología empleada para el diseño de sistemas de bombeo electrosumergible de crudo en proyectos anteriores se encuentra algo incompleta al momento de seleccionar los diversos dispositivos eléctricos que conforman dichos sistemas.
- La herramienta software desarrollada permite visualizar las señales de tensiones y corrientes tanto del cable como del motor para las condiciones de arranque y de trabajo normal.
- Permite la realimentación durante el proceso de diseño de los sistemas de bombeo electrosumergible.
- La herramienta software muestra el comportamiento eléctrico de dos de los principales elementos dentro de los sistemas B.E.S, como son el motor de inducción y su cable de alimentación. Mejorando la calidad de la información que permite seleccionar estos elementos e incluso puede ser utilizada en la especificación de otros elementos como son el caso de las protecciones eléctricas.

- Ayuda a disminuir los problemas futuros que se pueden presentar después de instalado el sistema B.E.S, reduciendo de esta forma sus costos operacionales.
- La metodología aquí desarrollada puede aplicarse de igual forma al redimensionamiento de los equipos en futuras optimizaciones de los sistemas ya instalados o en funcionamiento.
- ATP o ATPDraw brinda la oportunidad de implementar modelos más detallados de los diferentes elementos estudiados en el presente proyecto. Abriendo la posibilidad a una nueva serie de futuros desarrollos en la herramienta software creada.
- La herramienta software crea un puente informático que permite extraer los resultados obtenidos por el ATP y llevarlos a un ambiente más amigable como lo es Matlab, facilitando de esta forma su manipulación y posterior análisis.
- Esta herramienta software brinda los aspectos básicos encontrados en la placa de características del motor de inducción empleado en una instalación de bombeo electrosumergible de crudo.
- Esta herramienta software da la oportunidad a los ingenieros electricistas de incursionar dentro de la industria petrolera y expandir sus oportunidades laborales.

6.2. Desarrollos futuros

La calidad de los modelos contenidos en el ATP permite contemplar futuros desarrollos de la herramienta software creada, con el fin de no sólo mejorar la especificación del motor de inducción y el cable de alimentación del motor que conforman los sistemas B.E.S. si no también, la de brindar un estudio más detallado y completo de todo el sistema. Con miras a desarrollar estrategias en el manejo y control integral de estos sistemas.

Entre la diversa gama de posibles desarrollos futuros se pueden mencionar o contemplar entre otros:

- Un análisis de fallas en el motor eléctrico.
- Un análisis de fallas en diversos puntos del cable de alimentación.
- Estudio de armónicos en los sistemas.
- Desarrollo de nuevos modelos para los variadores de tensión.
- Estudios de confiabilidad y eficiencia de los sistemas de potencia eléctrica.
- Elaborar el control del arranque suave con eliminación de armónicos indeseables.

Bibliografía

- [1] Esparza D. Adriana, Fonseca N. Germán O, Inares M, Alfonso. *Herramienta Software para el Diseño del Sistema de Levantamiento Artificial por Bombeo Electrosumergible*, Tesis de pregrado de La Universidad Industrial de Santander UIS, 1995
- [2] Fredy Alonso Peña Suescun. *Proyecto de Grado en la Modalidad de Práctica Empresarial Bombeo Electrosumergible, Descripción, Diseño y Monitoreo*. Tesis de pregrado de La Universidad Industrial de Santander UIS, 2005
- [3] Gustavo Adolfo Pertuz Sierra. *Evaluación Técnico-Económica de la utilización de bombeo electrosumergible como sistema de levantamiento artificial en los campos de la superintendencia de operaciones Orito de ecopetrol S.A.*. Tesis de pregrado de La Universidad Industrial de Santander UIS, 2005
- [4] Martínez M. Robinson D. *Descripción, Diseño y Monitoreo de una unidad de Bombeo Electro Sumergible Schlumberger-wcp-Artificial lift System*, Tesis de pregrado en la modalidad de práctica empresarial de La Universidad Industrial de Santander (UIS), 2004
- [5] Álvaro Fabián Muñoz Rodríguez, Edgar Torres Torres. *Evaluación Técnica de las Estrategias de Levantamiento Artificial Implementadas en Campos Maduros. Diseño de una Herramienta Software de Selección*. Tesis de pregrado de La Universidad Industrial de Santander UIS, 2007
- [6] Marcelo Hirschfeldt - Oilproduction.net, Rodrigo Ruiz - Universidad Nacional de la Patagonia San Juan Bosco (Argentina), *Conceptos de Well Performance*, Sep 2008 <http://www.oilproduction.net/cms/>

- [7] Howard B. Bradley, *Petroleum Engineering Handbook*, Society of Petroleum Engineers, 3ª edición Feb. 1992
- [8] Prabha Kundur, *Power System Stability and Control*, Mc graw-Hill, 1994, 1ª edición.
- [9] Hermann W. Dommel, *EMTP THEORY BOOK*, Microtran Power System Analysis Corporation, Vancouver, British Columbia, May, 1992.
- [10] *Alternative Transients Program (ATP) Rule Book*, Canadian/American EMTP User Group.
- [11] P.Hevia. Orlando, *El Motor de Inducción en el ATP*, CAUE-Comité Argentino de Usuarios del EMTP, Revista Iberoamericana del ATP Diciembre 1999 <http://www.iitree-unlp.org.ar/caue/Revista.htm>
- [12] Stephen J. Chapman, *Máquinas Eléctricas tercera edición*, Mc graw Hill, 2000.
- [13] Agencia Nacional de hidrocarburos (ANH), página web Plan mega 2020, última fecha de actualización: 2011-03-07, <http://www.anh.gov.co/media/ANH/mega.pdf>
- [14] Norma Técnica Colombiana 2050 (NTC 2050), CÓDIGO ELÉCTRICO COLOMBIANO. Icontec 2002. Primera actualización
- [15] Norma Técnica Colombiana 1340 (NTC 1340), ELECTROTECNIA. TENSIONES Y FRECUENCIA NOMINALES EN SISTEMAS DE ENERGÍA ELÉCTRICA EN REDES DE SERVICIO PÚBLICO. Icontec 2004, Segunda actualización.
- [16] Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas (RETIE). MINISTERIO DE MINAS Y ENERGÍA, 2004.
- [17] NORMA TÉCNICA ESSA, NORMAS PARA CÁLCULO Y DISEÑO DE SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN. Empresa Electrificadora de Santander. 2005.

- [18] A. Amentani, Formulación General de Impedancias y Admitancias de los Cables (A General Formulation of Impedance and Admittance of Cables), IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. Pas-99, N° 3 May/Jun 1980

Apéndice A

El ATPDraw

Introducción

El ATPDraw es un programa que permite simular los diversos transitorios electromagnéticos, electromecánicos y de sistemas de control en los sistemas eléctricos polifásicos de potencia que se pueden presentar. A través una interfaz gráfica diseñada para hacer del ATP más amigable y constructivo para el usuario.

Esto se debe a que el ATP tiene sus orígenes en el EMTP (Electromagnetic Transient Program) desarrollado en los setentas, el cual, gracias a los continuos cambios y avances en la tecnología de la computación han hecho evolucionar éste programa y los diversos modelos computacionales que posee [9, 10]. Convirtiendo al ATPDraw en uno de los programas con mayor reconocimiento y prestigio a nivel mundial.

El ATPDraw permite la visualización y el estudio de los problemas de operación en los sistemas eléctricos, mediante la simulación y el análisis de los transitorios que normalmente ocurren durante la operación de los sistemas eléctricos. Así como implementar soluciones, mejorar el diseño de sistemas y visualizar los resultados de dichos cambios.

El presente proyecto tiene como finalidad la especificación de equipos y elementos que son de vital importancia para el bombeo electrosumergible de crudo, como lo son el motor de inducción y su cable de alimentación. Se hace necesario

realizar un estudio mediante la simulación de algunos de los equipos eléctricos que conforman el sistema de potencia en los sistemas B.E.S, con el fin de contribuir a una mejor selección de los mismos y de la eficiencia total del sistema de producción de crudo.

Por tal motivo el presente anexo pretende mostrar de forma básica los modelos implementados dentro del ATP para el motor de inducción así como del cable eléctrico, ya que el análisis realizado en el presente proyecto se centra principalmente en la optimización de la selección de estos dos elementos.

A.1. El motor de inducción en el ATPDraw

El tipo de motor empleado en el bombeo electrosumergible de crudo, es el motor de inducción trifásico, tipo jaula de ardilla, de dos polos, operando a una frecuencia de 60 Hz. El cual es modelado por el ATP como una máquina universal tipo 3 (UM 3) [11, 10, 9, 8].

A.1.1. Modelo de la máquina de Inducción

En el ATP, la máquina universal puede tener hasta tres devanados de armadura, que se pueden convertir a tres devanados hipotéticos d , q , 0 . Donde la estructura de campo puede tener cualquier número de devanados en los ejes directo (d) y en cuadratura (q). También puede tener un devanado en el eje 0 .

La parte mecánica de la máquina universal requiere que el usuario la represente como una red eléctrica equivalente con elementos R , L y C concentrados, que se resuelve como si fuera parte de la red eléctrica completa como muestra la figura A.1. Y el torque electromagnético de la máquina universal aparece como una fuente de corriente en esta red equivalente.

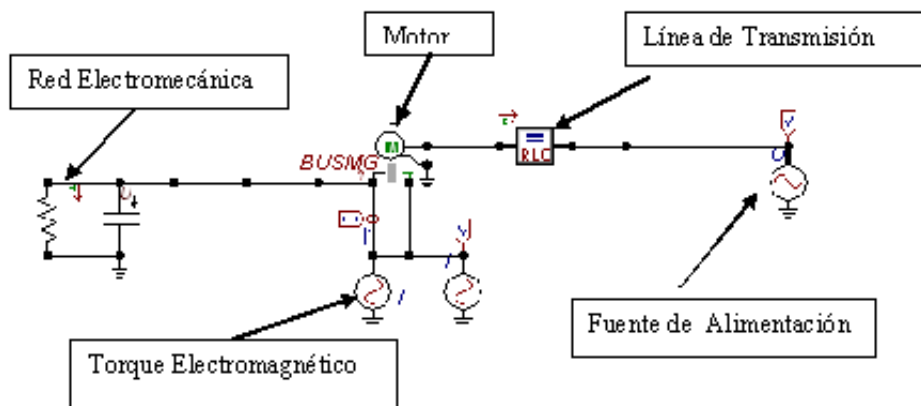


Figura A.1: Modelo del motor de inducción en el ATPDraw
Fuente: Autores

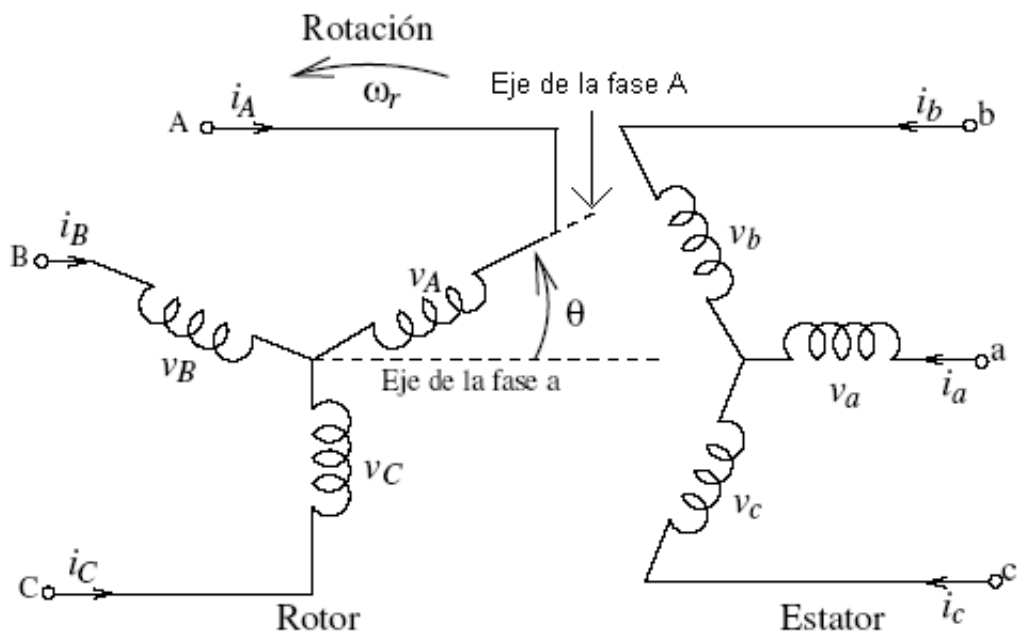


Figura A.2: Circuitos del estator y el rotor de una máquina de inducción
Fuente:[8] Prabha Kundur, *Power System Stability and Control*.

Ecuaciones básicas de la máquina de inducción.

El motor de inducción trifásico, posee tres devanados de armadura, que corresponden a las tres fases del sistema de alimentación a, b y c. Los cuales se encuentran distribuidos unos 120° dentro del estator y que al estar alimentados por un juego de corrientes trifásicas de igual magnitud pero desfasadas 120° entre sí; producen un campo magnético rotacional de magnitud constante.

Por otra parte, el rotor posee un devanado tipo jaula de ardilla, que consiste de una serie de barras unidas o cortocircuitadas entre sí, a través de un anillo conductor en cada uno de sus extremos. Y que por conveniencia para el análisis, pueden ser representadas por tres devanados A, B y C como muestra la figura A.2; en la cual se ve como el ángulo por el cual el eje de la fase A del rotor adelanta al eje de la fase a del estator en la dirección de rotación se define como θ . El cual varía a una velocidad angular constante de ω_r en radianes eléctricos por segundo (rad/s).

$$\theta = \omega_r \cdot t \text{ rad elec} \quad (\text{A.1})$$

Que a un deslizamiento constante (s) se convierte en la ecuación (A.2)

$$\theta = (1 - s) \omega_s \cdot t \text{ [rad elec/s]} \quad (\text{A.2})$$

Ahora si se desprecia algunos fenómenos que ocurren en el interior del motor tales como la saturación, la histéresis, las corrientes de Eddy y se asume una distribución sinusoidal pura de las ondas de flujo, se encuentra que las tensiones en cada uno de los devanados están dadas por las ecuaciones (A.3), (A.4) y (A.5) para el estator y las ecuaciones (A.6), (A.7) y (A.36) para el rotor.

Ecuaciones para las tensiones del estator:

$$v_a = R_s \cdot i_a + p\psi_a \quad (\text{A.3})$$

$$v_b = R_s \cdot i_b + p\psi_b \quad (\text{A.4})$$

$$v_c = R_s \cdot i_c + p\psi_c \quad (\text{A.5})$$

Ecuaciones para las tensiones en el rotor:

$$v_A = R_r \cdot i_A + p\psi_A \quad (\text{A.6})$$

$$v_B = R_r \cdot i_B + p\psi_B \quad (\text{A.7})$$

$$v_C = R_r \cdot i_C + p\psi_C \quad (\text{A.8})$$

Donde R_s representa la resistencia de fase del estator, R_r la resistencia de fase del rotor, ψ_x el flujo ligado a cada uno de los devanados respectivamente y el operador p representa el operador diferencial $\frac{d}{dt}$.

Si se consideran despreciables los efectos causados por las ranuras y que el rotor tiene una estructura simétrica, las inductancias mutuas entre los devanados del estator y el rotor se pueden considerar como funciones de la posición del rotor definida por el ángulo θ . Con lo cual el flujo ligado en las fases del estator en cualquier instante de tiempo está determinado por la ecuaciones (A.9) y (A.10).

$$\underbrace{\begin{bmatrix} \psi_a \\ \psi_b \\ \psi_c \end{bmatrix}}_{[\psi_{abc}]} = \underbrace{\begin{bmatrix} l_s & l_{ms} & l_{ms} \\ l_{ms} & l_s & l_{ms} \\ l_{ms} & l_{ms} & l_s \end{bmatrix}}_{[L_s]} \underbrace{\begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix}}_{[i_{abc}]} + \underbrace{\begin{bmatrix} l_{msr} \cos(\theta) & l_{msr} \cos(\theta + 120^\circ) & l_{msr} \cos(\theta - 120^\circ) \\ l_{msr} \cos(\theta - 120^\circ) & l_{msr} \cos(\theta) & l_{msr} \cos(\theta + 120^\circ) \\ l_{msr} \cos(\theta + 120^\circ) & l_{msr} \cos(\theta - 120^\circ) & l_{msr} \cos(\theta) \end{bmatrix}}_{[L_{msr}]} \underbrace{\begin{bmatrix} i_A \\ i_B \\ i_C \end{bmatrix}}_{[i_{ABC}]} \quad (\text{A.9})$$

$$\underbrace{\begin{bmatrix} \psi_A \\ \psi_B \\ \psi_C \end{bmatrix}}_{[\psi_{ABC}]} = \underbrace{\begin{bmatrix} l_{msr} \cos(\theta) & l_{msr} \cos(\theta - 120^\circ) & l_{msr} \cos(\theta + 120^\circ) \\ l_{msr} \cos(\theta + 120^\circ) & l_{msr} \cos(\theta) & l_{msr} \cos(\theta - 120^\circ) \\ l_{msr} \cos(\theta - 120^\circ) & l_{msr} \cos(\theta + 120^\circ) & l_{msr} \cos(\theta) \end{bmatrix}}_{[L_{mrs}]} \underbrace{\begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix}}_{[i_{abc}]} + \underbrace{\begin{bmatrix} l_r & l_{mr} & l_{mr} \\ l_{mr} & l_r & l_{mr} \\ l_{mr} & l_{mr} & l_r \end{bmatrix}}_{[L_r]} \underbrace{\begin{bmatrix} i_A \\ i_B \\ i_C \end{bmatrix}}_{[i_{ABC}]} \quad (\text{A.10})$$

Dónde:

l_s = Autoinductancia de los devanados en el estator.

l_r = Autoinductancia en los devanados del rotor.

l_{ms} = Inductancia mutua entre cualquier par de devanados del estator.

l_{mr} = Inductancia mutua entre cualquier par de devanados del rotor.

l_{msr} = Inductancia mutua entre cualquier par de devanados situados uno en el estator y el otro en el rotor.

Ecuaciones básicas en un sistema de coordenadas d-q-0.

Como se puede observar en la subsección anterior, la aplicación de las ecuaciones determinadas allí, es complicada gracias a la presencia de algunas expresiones que son variables en el tiempo. Por tal motivo, se hace necesario el cambiar a un sistema en cual la presencia de dichas expresiones variantes en el tiempo sea eliminada y así obtener ecuaciones más simples. Razón por la cual se utiliza la transformada de Park (A.11) como la herramienta para realizar dicho cambio.

$$[P]^{-1} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(x) & \cos(x - 120^\circ) & \cos(x + 120^\circ) \\ \text{sen}(x) & \text{sen}(x - 120^\circ) & \text{sen}(x + 120^\circ) \\ 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} \end{bmatrix} \quad (\text{A.11})$$

Siendo esta una matriz ortogonal con lo cual:

$$[P] = [P]_{\text{Traspuesta}}^{-1} \quad (\text{A.12})$$

Ya que las frecuencias a las cuales varían las corrientes y tensiones inducidas en el rotor son diferentes a las del estator, se hace necesario variar ligeramente las expresiones de la transformada de Park, para poder llevar todo a un único sistema de referencia.

1. Transformada de Park para las expresiones del estator

$$[P_1]^{-1} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\omega_s \cdot t) & \cos(\omega_s \cdot t - 120^\circ) & \cos(\omega_s \cdot t + 120^\circ) \\ \text{sen}(\omega_s \cdot t) & \text{sen}(\omega_s \cdot t - 120^\circ) & \text{sen}(\omega_s \cdot t + 120^\circ) \\ 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} \end{bmatrix} \quad (\text{A.13})$$

2. Transformada de Park para las expresiones del rotor

$$[P_2]^{-1} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta_r) & \cos(\theta_r - 120^\circ) & \cos(\theta_r + 120^\circ) \\ \text{sen}(\theta_r) & \text{sen}(\theta_r - 120^\circ) & \text{sen}(\theta_r + 120^\circ) \\ 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} \end{bmatrix} \quad (\text{A.14})$$

Donde θ_r es el ángulo por el cual el eje d adelanta al eje de la fase A del rotor.

Aplicando estas transformadas a las expresiones se encuentra que:

1. Transformada de las corrientes estáticas de fase

$$[i_{dq0}] = [P_1]^{-1} [i_{abc}]$$

$$\begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ i_o \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\omega_s \cdot t) \cdot i_a + \cos(\omega_s \cdot t - 120^\circ) \cdot i_b + \cos(\omega_s \cdot t + 120^\circ) \cdot i_c \\ \text{sen}(\omega_s \cdot t) \cdot i_a + \text{sen}(\omega_s \cdot t - 120^\circ) \cdot i_b + \text{sen}(\omega_s \cdot t + 120^\circ) \cdot i_c \\ i_a/\sqrt{2} + i_b/\sqrt{2} + i_c/\sqrt{2} \end{bmatrix} \quad (\text{A.15})$$

2. Transformada de las corrientes rotóricas de fase

$$[i_{DQO}] = [P_2]^{-1} [i_{ABC}]$$

$$\begin{bmatrix} i_D \\ i_Q \\ i_O \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta_r) \cdot i_A + \cos(\theta_r - 120^\circ) \cdot i_B + \cos(\theta_r + 120^\circ) \cdot i_C \\ \sin(\theta_r) \cdot i_A + \sin(\theta_r - 120^\circ) \cdot i_B + \sin(\theta_r + 120^\circ) \cdot i_C \\ i_A/\sqrt{2} + i_B/\sqrt{2} + i_C/\sqrt{2} \end{bmatrix} \quad (\text{A.16})$$

3. Transformada de los flujos ligados en el estator.

$$[\psi_{dqo}] = [P_1]^{-1} [\psi_{abc}]$$

$$\begin{bmatrix} \psi_d \\ \psi_q \\ \psi_o \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (l_s - l_{ms}) \cdot i_d + (3/2) l_{msr} \cdot i_D \\ (l_s - l_{ms}) \cdot i_q + (3/2) l_{msr} \cdot i_Q \\ (l_s + 2l_{ms}) \cdot i_o + (3/2) l_{msr} \cdot i_O \end{bmatrix} \quad (\text{A.17})$$

Dónde

$L_{ss} = l_s - l_{ms}$ = Inductancia por fase del estator.

$L_m = (3/2) l_{msr}$ = Inductancia de magnetización por fase del motor.

4. Transformada de los flujos ligados en el rotor.

$$[\psi_{DQO}] = [P_2]^{-1} [\psi_{ABC}]$$

$$\begin{bmatrix} \psi_D \\ \psi_Q \\ \psi_O \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (3/2) l_{msr} \cdot i_d + (l_r - l_{mr}) \cdot i_D \\ (3/2) l_{msr} \cdot i_q + (l_r - l_{mr}) \cdot i_Q \\ (3/2) l_{msr} \cdot i_o + (l_r + 2l_{mr}) \cdot i_O \end{bmatrix} \quad (\text{A.18})$$

Dónde

$L_{rr} = l_r - l_{mr}$ = Inductancia por fase del rotor.

$L_m = (3/2) l_{msr}$ = Inductancia de magnetización por fase del motor.

Con lo cual las tensiones en términos de las componentes d-q-o son:

1. tensiones en el estator

$$\begin{aligned} v_d &= R_s \cdot i_d - \omega_s \psi_q + p\psi_d \\ v_q &= R_s \cdot i_q + \omega_s \psi_d + p\psi_q \end{aligned} \quad (\text{A.19})$$

2. tensiones en el rotor

$$\begin{aligned} v_D &= R_r \cdot i_D - s\omega_s \psi_Q + p\psi_D \\ v_Q &= R_r \cdot i_Q + s\omega_s \psi_D + p\psi_Q \end{aligned} \quad (\text{A.20})$$

$$\text{Con } s\omega_s = p\theta_r$$

Modelo del motor de inducción en estado estable

En un sistema trifásico balanceado en estado estable, las corrientes del estator en el motor de inducción pueden ser representadas como muestran las ecuaciones (A.21).

$$\begin{aligned} i_a &= I_m \cos(\omega_s \cdot t + \alpha) \\ i_b &= I_m \cos(\omega_s \cdot t - 120^\circ + \alpha) \\ i_c &= I_m \cos(\omega_s \cdot t + 120^\circ + \alpha) \end{aligned} \quad (\text{A.21})$$

Dónde:

I_m = Corriente pico por fase del estator.

Si se aplica la transformada de Park a estas corrientes como se vio anteriormente (A.15), se encuentra que:

$$\begin{aligned} i_d &= \sqrt{\frac{3}{2}} \cdot I_m \cos(\alpha) \\ i_q &= -\sqrt{\frac{3}{2}} \cdot I_m \sin(\alpha) \\ i_o &= 0 \end{aligned} \quad (\text{A.22})$$

$i_o = 0$, debido a que en un sistema balanceado $i_a + i_b + i_c = 0$.

En consecuencia, se puede ver que para un sistema balanceado en estado estable, las corrientes del estator en el sistema d-q-0, se aprecian como corriente directa. Y si se aplica la transformada inversa a estas corrientes se observa que:

$$\begin{aligned} i_s &= i_a = i_d \cdot \cos(\omega_s \cdot t) + i_q \cdot \text{sen}(\omega_s \cdot t) \\ i_s &= i_d \cdot \cos(\omega_s \cdot t) + i_q \cdot \cos(\omega_s \cdot t + 90^\circ) \end{aligned} \quad (\text{A.23})$$

Usando \tilde{I} para denotar el valor eficaz de la corriente del estator, la ecuación (A.23) puede ser reescrita como:

$$\tilde{I}_s = i_d + ji_q \quad (\text{A.24})$$

De forma similar la ecuación de la corriente en el rotor es:

$$\tilde{I}_r = i_D + ji_Q \quad (\text{A.25})$$

Observando las ecuaciones (A.19) y (A.20), se ve que los términos $p\psi$ desaparecen en el estado estable y con ayuda de las ecuaciones (A.17) y (A.18), es posible reescribirlas como:

$$\begin{aligned} V_d &= R_s i_d - \underbrace{\omega_s L_{ss} i_q}_{X_{ss}} - \underbrace{\omega_s L_m i_Q}_{X_m} \\ V_q &= R_s i_q + \underbrace{\omega_s L_{ss} i_d}_{X_{ss}} + \underbrace{\omega_s L_m i_D}_{X_m} \end{aligned} \quad (\text{A.26})$$

$$\begin{aligned} V_D &= R_r i_D - s \cdot \omega_s L_{rr} i_Q - s \cdot \omega_s L_m i_q = 0 \\ V_Q &= R_r i_Q + s \cdot \omega_s L_{rr} i_D + s \cdot \omega_s L_m i_d = 0 \end{aligned} \quad (\text{A.27})$$

Las ecuaciones (A.27) se igualan a cero, debido al hecho, de que el devanado o los devanados del rotor se encuentran en la realidad cortocircuitados. De forma análoga que con la corrientes del estator, las tensiones son:

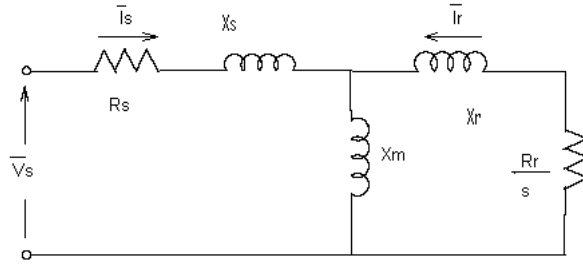


Figura A.3: Circuito del motor de inducción en estado estable
Fuente:[8] Prabha Kundur, *Power System Stability and Control*.

$$\begin{aligned}
 V_s &= V_a = V_d \cos(\omega_s \cdot t) + V_q \sin(\omega_s \cdot t) \\
 \tilde{V}_s &= V_d + jV_q \\
 \tilde{V}_s &= R_s \tilde{I}_s + jX_{ss} \cdot I_s + jX_m \cdot I_r \\
 \tilde{V}_s &= R_s \tilde{I}_s + \underbrace{j(X_{ss} - X_m)}_{X_s} \cdot I_s + jX_m \cdot (I_s + I_r)
 \end{aligned}$$

$$\tilde{V}_s = R_s \cdot I_s + jX_s \cdot I_s + jX_m (I_s + I_r) \quad (\text{A.28})$$

$$\begin{aligned}
 \tilde{V}_r &= 0 = V_D + jV_Q \\
 \tilde{V}_r &= 0 = R_r \tilde{I}_r + js \cdot X_{rr} \cdot I_r + js \cdot X_m \cdot I_s \\
 \tilde{V}_r &= 0 = R_r \tilde{I}_r + js \cdot \underbrace{(X_{rr} - X_m)}_{X_r} \cdot I_r + js \cdot X_m \cdot (I_s + I_r)
 \end{aligned}$$

$$\tilde{V}_r = 0 = \frac{R_r}{s} \cdot I_r + jX_r \cdot I_r + jX_m (I_s + I_r) \quad (\text{A.29})$$

Analizando detenidamente las ecuaciones (A.28) y (A.29), estas corresponden a dos ecuaciones de malla que representan un circuito como el mostrado en la figura A.3.

Donde $X_s = X_{ss} - X_m$ y $X_r = X_{rr} - X_m$ con lo cual:

$$X_{ss} = X_s + X_m \quad (\text{A.30})$$

$$X_{rr} = X_r + X_m \quad (\text{A.31})$$

$X_{ss} = X_s + X_{ms}$ = Reactancia inductiva por fase del estator en coordenadas d-q-0.

X_s = Reactancia inductiva por fase del estator del modelo en estado estable.

$X_{rr} = X_r + X_m$ = Reactancia inductiva por fase del rotor en coordenadas d-q-0.

X_r = Reactancia inductiva por fase del rotor del modelo en estado estable.

X_m = Reactancia inductiva de magnetización por fase del motor.

A.2. Cable de alimentación

Existe una gran variedad de tipos de cables en el mercado, lo cual dificulta; que un programa pueda calcular sus valores de R,L y C para cualquiera de estos [10, 9, 18].

El ATPDRaw presenta la herramienta Line Constants or Cable (LCC) lo cual permite crear muy buenos modelos para la simulación de cables. Ya que el presente proyecto trata sobre la determinación de algunos elementos que conforman un sistema BES dentro de los cuales se encuentra el cable de alimentación del motor. Se usa el modelo (single core cable) que se encuentra dentro de la herramienta LCC para simular este elemento en el sistema a estudiar.

A.2.1. Modelado del cable del motor

La impedancia y la admitancia de un cable esta definidas por las siguientes ecuaciones diferenciales matriciales de primer orden.

$$\frac{dV}{dx} = - [z]^* [I] \quad (\text{A.32})$$

$$\frac{dI}{dx} = - [Y]^* [V] \quad (\text{A.33})$$

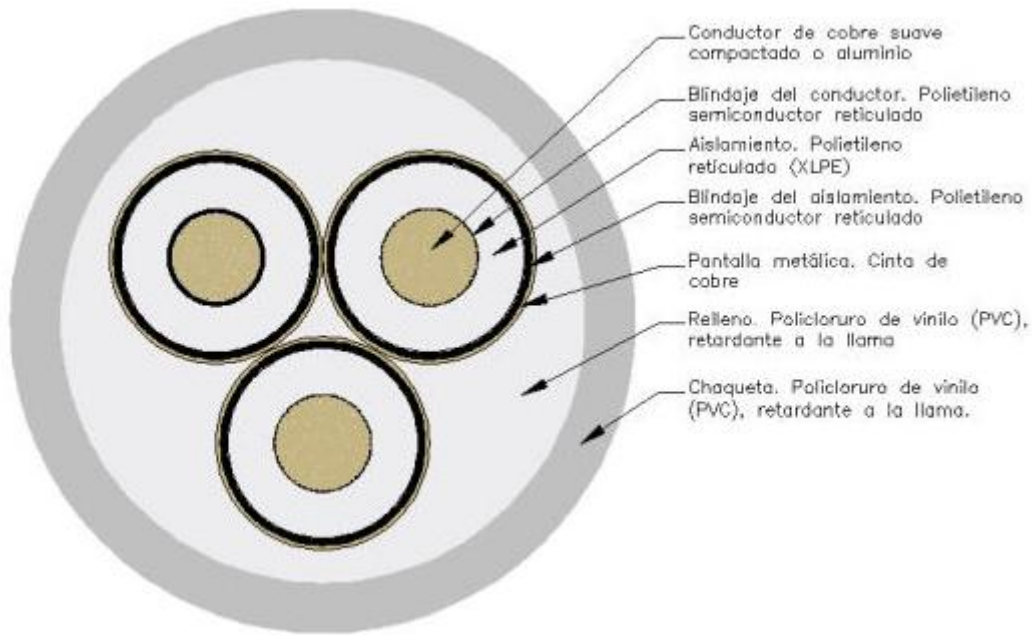


Figura A.4: Cable de alta tensión
Fuente: SCHLUMBERGER -WCP-Artificial Lift System

Donde $[V]$ e $[I]$ son los vectores de las tensiones y las corrientes a lo largo de una distancia x del cable. $[Z]$ y $[Y]$ son las matrices cuadradas de la impedancia y la admitancia que se obtienen a través de la rutina LCC. En general las matrices de impedancia y admitancia de un cable pueden ser representadas de la siguiente forma.

$$[Z] = [Z_i] + [Z_p] + [Z_c] + [Z_o] \quad (A.34)$$

$$\left. \begin{aligned} [Y] &= S [P]^{-1} \\ [P] &= [P_i] + [P_p] + [P_c] + [P_o] \end{aligned} \right\} \quad (A.35)$$

Donde $[P]$ es una matriz de coeficientes de potencial y $S=j\omega$.

En las ecuaciones (A.34) y (A.35) las matrices con subíndice "i" corresponde a un single core cable (SC Cable) y las matrices con subíndice "p" y "c" están relacionadas a la tubería.

Las matrices con subíndice “o” esta relacionadas con el medio externo del cable.

En la formulación presentada se realizan las siguientes suposiciones:

- Las corrientes de desplazamiento y pérdidas dieléctricas son insignificantes.
- Cada conductor del cable tiene su permeabilidad constante.

A.2.2. Matriz de impedancias del SC cable

Cuando un SC Cable consta de un conductor, chaqueta y armadura, la matriz de impedancia es dada de la siguiente forma.

$$[Z] = [Z_i] + [Z_o] \quad (\text{A.36})$$

Donde $[Z_i]$ es la matriz interna de impedancia del SC Cable

$$[Z_i] = \begin{bmatrix} [Z_{i1}] & [0] & \dots & [0] \\ [0] & [Z_{i2}] & \dots & [0] \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ [0] & [0] & [\dots] & [Z_{in}] \end{bmatrix} \quad (\text{A.37})$$

$[Z_o]$ es la matriz de impedancias del medio exterior del cable¹

$$[Z_o] = \begin{bmatrix} [Z_{o11}] & [Z_{o12}] & \dots & [Z_{o1n}] \\ [Z_{o12}] & [Z_{i22}] & \dots & [Z_{o2n}] \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ [Z_{o1n}] & [Z_{o2n}] & [\dots] & [Z_{onn}] \end{bmatrix} \quad (\text{A.38})$$

Una submatriz dentro de la diagonal de la matriz de autoimpedancia de un SC Cable está dada por

¹La impedancia de retorno de la tierra

$$[Z_{ij}] = \begin{bmatrix} [Z_{ccj}] & [Z_{csj}] & [Z_{caj}] \\ [Z_{csj}] & [Z_{ssj}] & [Z_{saj}] \\ [Z_{caj}] & [Z_{saj}] & [Z_{aaj}] \end{bmatrix} \quad (\text{A.39})$$

Dónde:

Z_{ccj} = Autoimpedancia del conductor

Z_{ssj} = Autoimpedancia de la chaqueta

Z_{aaj} = Autoimpedancia de la armadura

Z_{csj} = Impedancia mutua entre la armadura y la chaqueta

Z_{caj} = Impedancia mutua entre el conductor y armadura

Z_{saj} = Impedancia mutua entre la chaqueta y la armadura

Cuando el SC Cable consta solo del conductor y la chaqueta la matriz de la ecuación (A.41) se reduce a una matriz de 2x2

$$[Z_{ij}] = \begin{bmatrix} [Z_{ccj}] & [Z_{csj}] \\ [Z_{csj}] & [Z_{ssj}] \end{bmatrix} \quad (\text{A.40})$$

Si un SC Cable consta solo de un conductor la submatriz se reduce solo a un elemento.

$$[Z_{ij}] = [Z_{ccj}] \quad (\text{A.41})$$

Una submatriz de la matriz de impedancia de retorno de la tierra $[Z_o]$ es dada de la siguiente forma

$$[Z_{ojk}] = \begin{bmatrix} [Z_{ojk}] & [Z_{ojk}] & [Z_{ojk}] \\ [Z_{ojk}] & [Z_{ojk}] & [Z_{ojk}] \\ [Z_{ojk}] & [Z_{ojk}] & [Z_{ojk}] \end{bmatrix} \quad (\text{A.42})$$

Cuando el SC Cable consta de conductor y chaqueta la matriz queda reducida a una matriz de 2X2

$$[Z_{ojk}] = \begin{bmatrix} [Z_{ojk}] & [Z_{ojk}] \\ [Z_{ojk}] & [Z_{ojk}] \end{bmatrix} \quad (\text{A.43})$$

Si el SC Cable se compone solo de conductor la matriz se constituye por un único elemento

$$[Z_{ojk}] = [Z_{ojk}] \quad (\text{A.44})$$

A.2.3. Coeficientes de potencial

La matriz de admitancia de un sistema de cable se evalúa desde la matriz de coeficientes de potenciales que se da en la ecuación (A.35)

1. Cable aéreo

$$[P] = [P_i] + [P_o] \quad (\text{A.45})$$

2. Cable subterráneo

$$[P] = [P_i] \quad (\text{A.46})$$

$[P_i]$ = Matriz de coeficientes de potencial interno del cable

$$[P_i] = \begin{bmatrix} [P_{i1}] & \dots & 0 \\ \vdots & [P_{i2}] & \vdots \\ 0 & \dots & [P_{in}] \end{bmatrix} \quad (\text{A.47})$$

$[P_o]$ = Matriz de coeficientes de potencial del sistema aéreo

$$[P_o] = \begin{bmatrix} [P_{o11}] & [P_{o12}] & \dots & [P_{o1n}] \\ [P_{o12}] & [P_{o22}] & \dots & [P_{o12n}] \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ [P_{o1n}] & [P_{o2n}] & \dots & [P_{onn}] \end{bmatrix} \quad (\text{A.48})$$

Todas las submatrices fuera de la diagonal de $[P_i]$ son cero. Una submatriz diagonal expresa la matriz de coeficientes de potenciales de un SC Cable. Cuando

el SC Cable consta de conductor, chaqueta y armadura. La submatriz diagonal se da como

$$[P_{ij}] = \begin{bmatrix} P_{cj} + P_{sj} + P_{aj} & P_{sj} + P_{aj} & P_{aj} \\ P_{sj} + P_{aj} & P_{sj} + P_{aj} & P_{aj} \\ P_{aj} & P_{aj} & P_{aj} \end{bmatrix} \quad (\text{A.49})$$

Cuando el cable consta de conductor y chaqueta la matriz queda reducida

$$[P_{ij}] = \begin{bmatrix} P_{cj} + P_{sj} & P_{sj} \\ P_{sj} & P_{sj} \end{bmatrix} \quad (\text{A.50})$$

Si el cable se compone únicamente del conductor se obtiene solo un elemento

$$[P_{ij}] = [P_{cj}] \quad (\text{A.51})$$

La submatrices [Po] es

$$[P_{ojk}] = \begin{bmatrix} [P_{ojk}] & [P_{ojk}] & [P_{ojk}] \\ [P_{ojk}] & [P_{ojk}] & [P_{ojk}] \\ [P_{ojk}] & [P_{ojk}] & [P_{ojk}] \end{bmatrix} \quad (\text{A.52})$$

Donde [Pojk] es el coeficiente de potencial de espacio para el caso dado

Apéndice B

Figuras

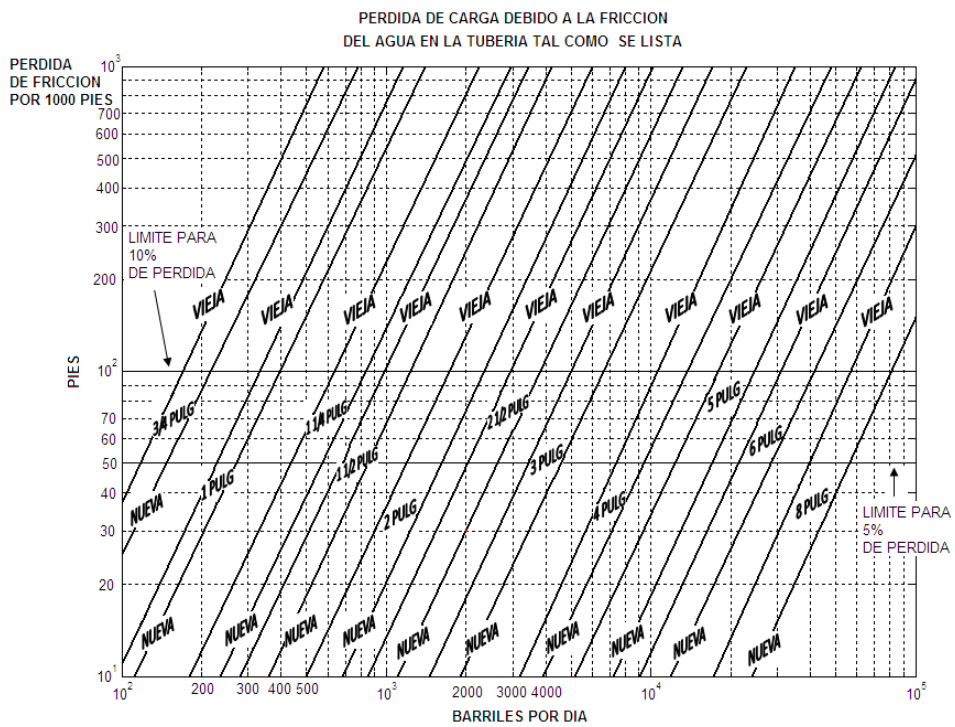


Figura B.1: Carta de pérdidas por fricción

Fuente: [1] Herramienta software para el diseño del sistema de levantamiento artificial por bombeo electrosumergible

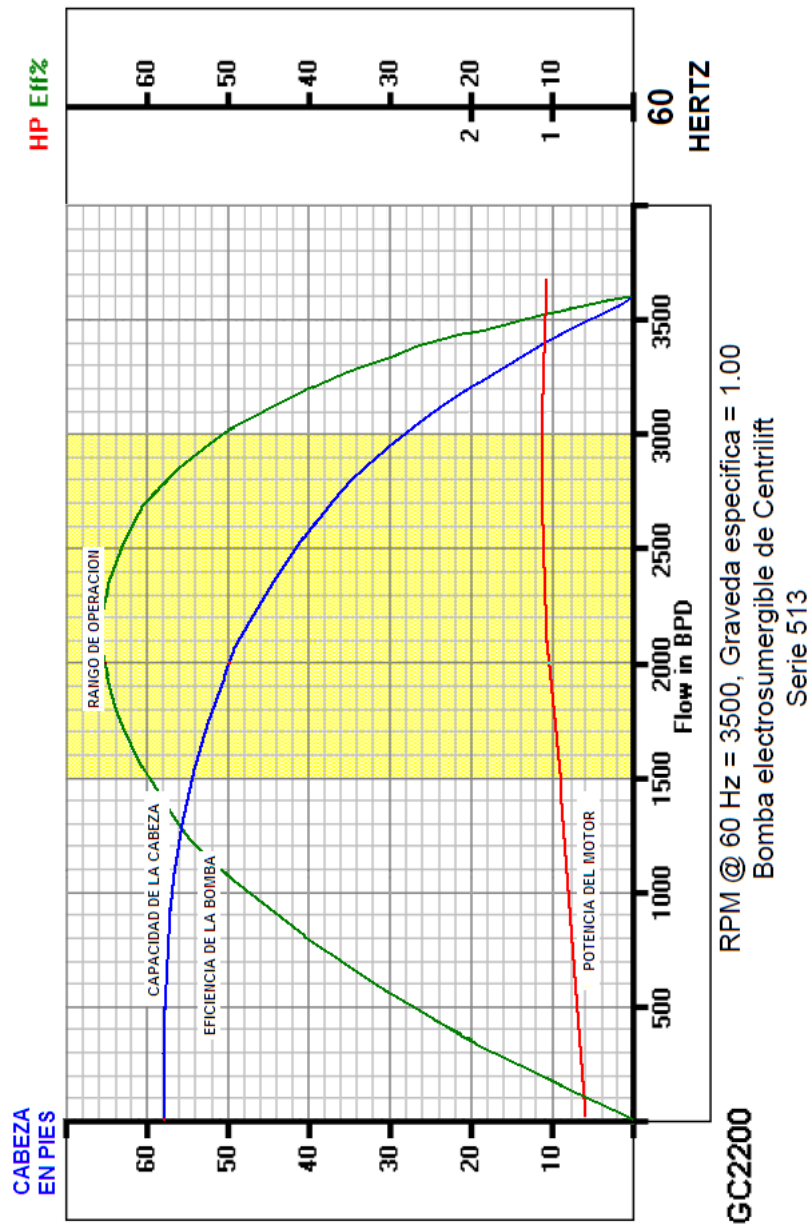


Figura B.2: Comportamiento de la etapa de una bomba
Fuente:[1] Herramienta software para el diseño del sistema de levantamiento artificial por bombeo electrosumergible

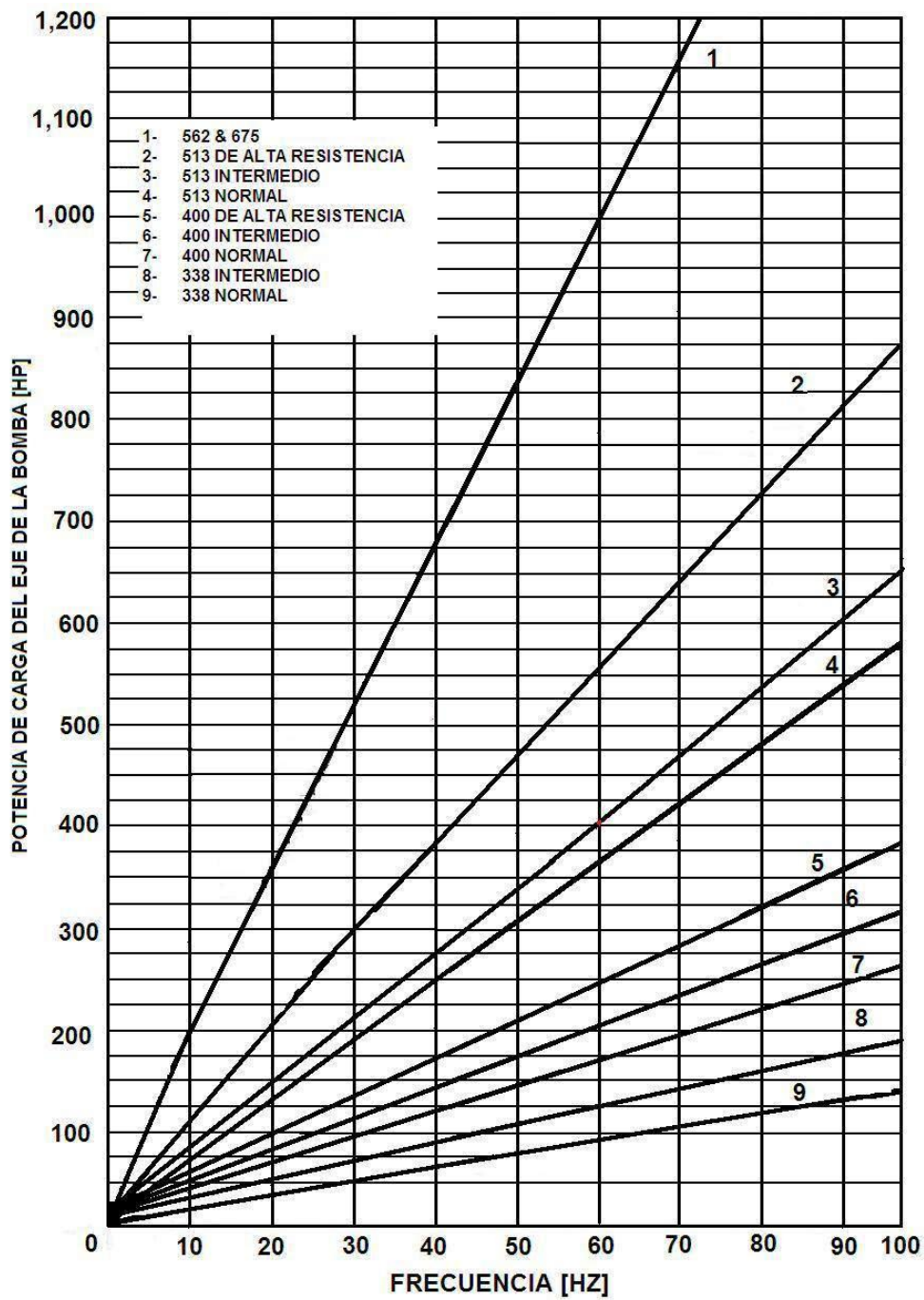


Figura B.3: Límite de potencia del eje de la bomba
 Fuente: [1] Herramienta software para el diseño del sistema de levantamiento artificial por bombeo electrosumergible

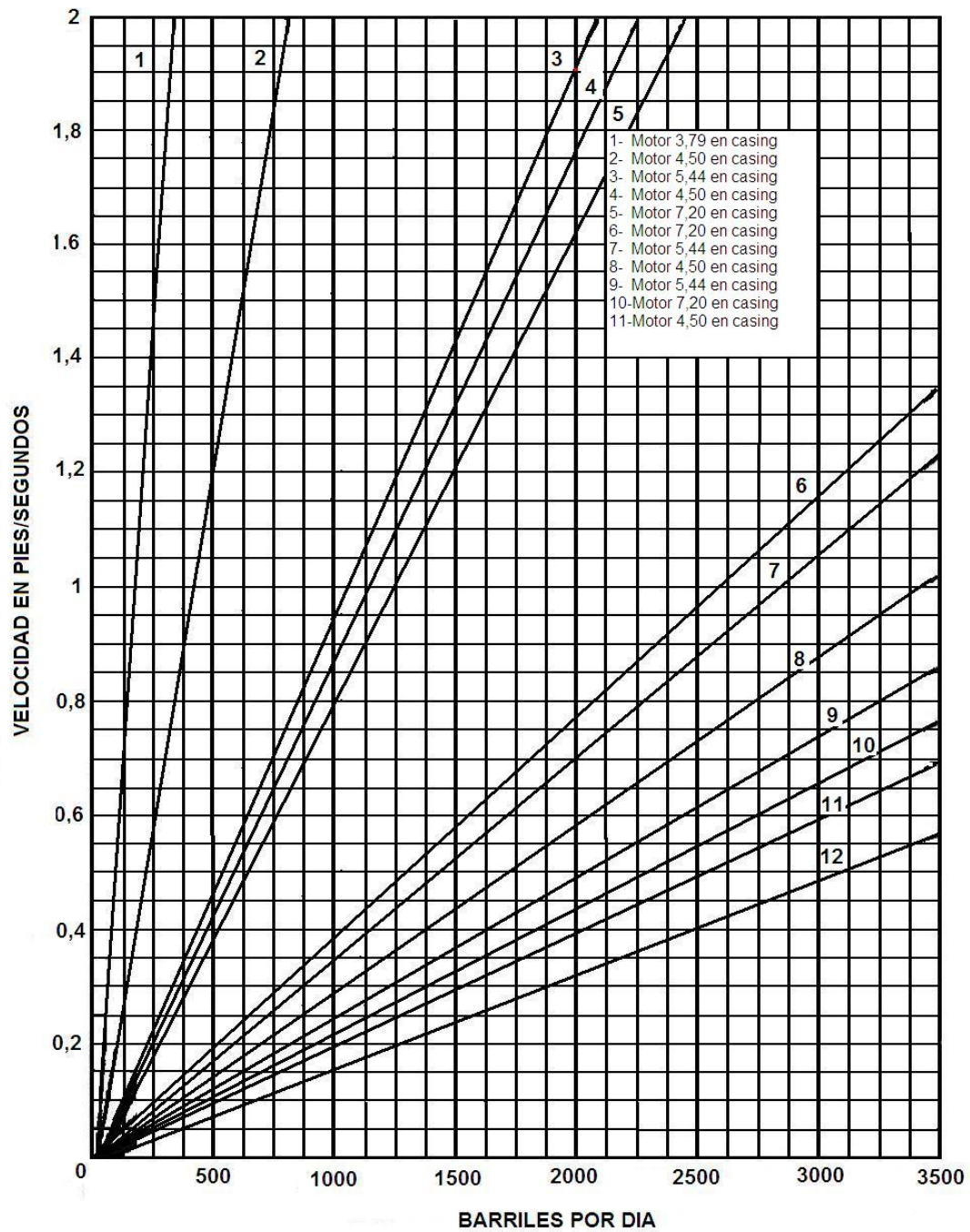
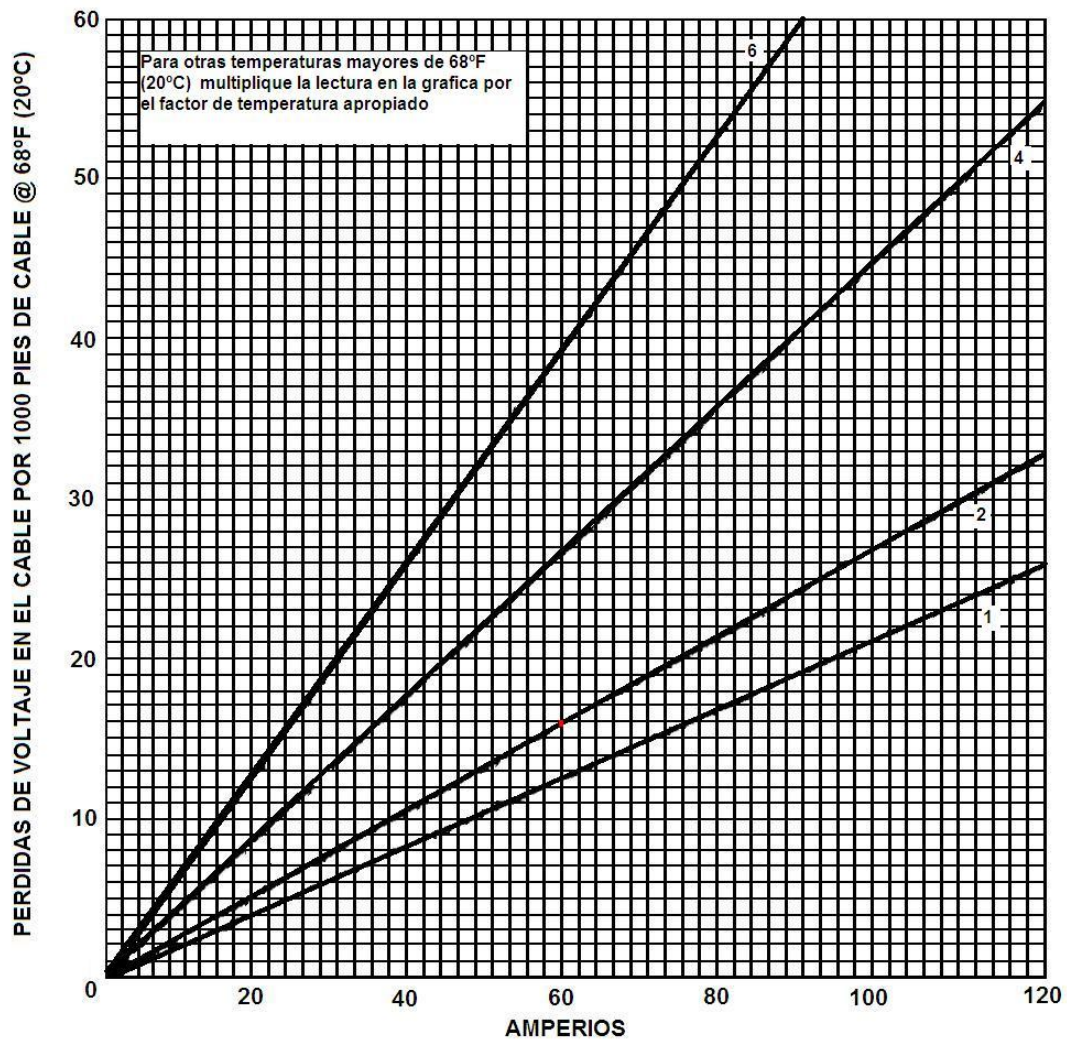


Figura B.4: Velocidad del fluido pasando por el motor
 Fuente: [1] Herramienta software para el diseño del sistema de levantamiento artificial por bombeo electrosumergible



| Temp. °F (°C) | Factor | Temp. °F (°C) | Factor | Temp. °F (°C) | Factor |
|---------------|--------|---------------|--------|---------------|--------|
| 100 (38) | 1,070 | 170 (77) | 1,223 | 240 (116) | 1,376 |
| 110 (43) | 1,092 | 180 (82) | 1,245 | 250 (121) | 1,398 |
| 120 (49) | 1,114 | 190 (88) | 1,267 | 260 (127) | 1,420 |
| 130 (54) | 1,134 | 200 (93) | 1,289 | 270 (132) | 1,441 |
| 140 (60) | 1,157 | 210 (99) | 1,310 | 280 (138) | 1,463 |
| 150 (66) | 1,179 | 220 (104) | 1,332 | 290 (143) | 1,485 |
| 160 (71) | 1,201 | 230 (110) | 1,354 | 300 (149) | 1,507 |

Figura B.5: Caída de tensión en los cables por cada 1000 pies de longitud
Fuente: [1] Herramienta software para el diseño del sistema de levantamiento artificial por bombeo electrosumergible

TEMPERATURA DE POZO vs. CORRIENTE
Cable Redondo

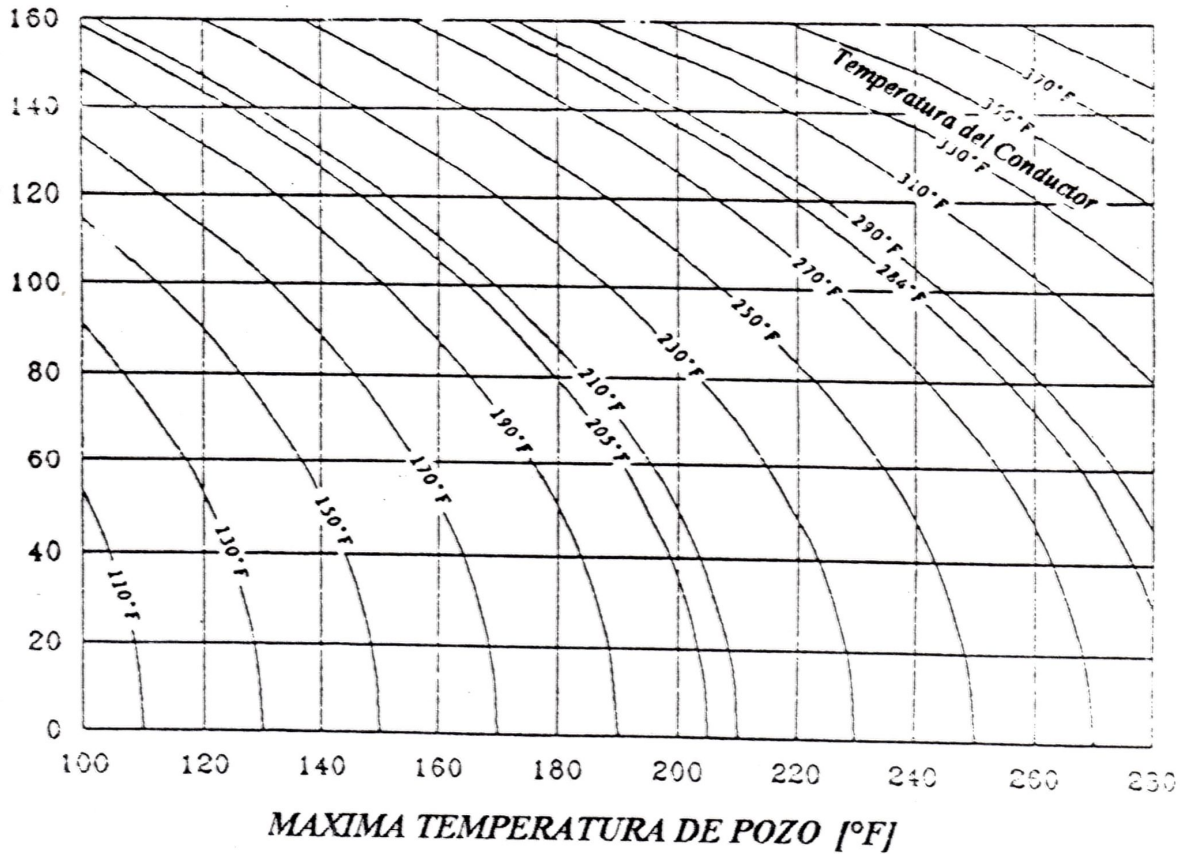


Figura B.6: Temperatura de operación del conductor N° 2
 Fuente: [1] Herramienta software para el diseño del sistema de levantamiento artificial por bombeo electrosumergible

TEMPERATURA DE POZO vs. CORRIENTE
Cable Redondo, No. 6

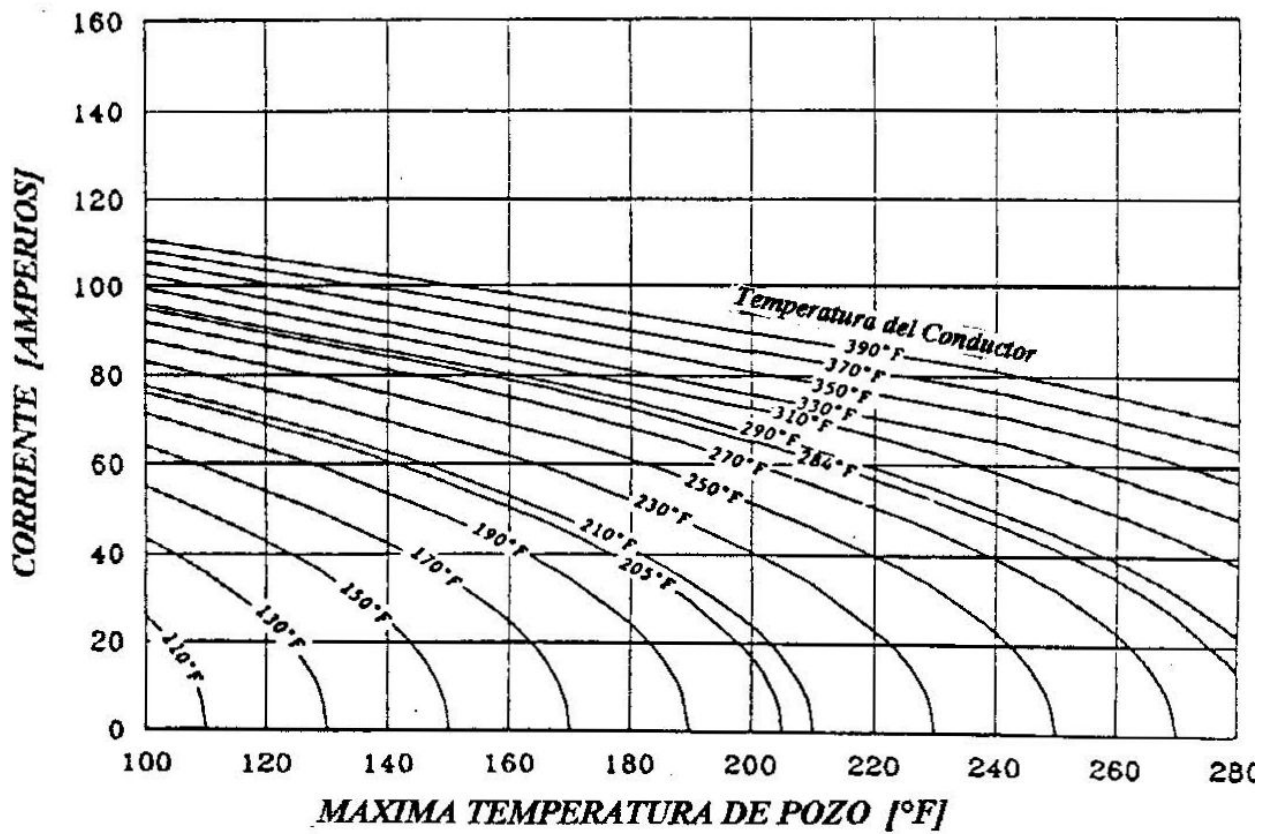


Figura B.7: Temperatura de operación del conductor N° 6
 Fuente: [1] Herramienta software para el diseño del sistema de levantamiento artificial por bombeo electrosumergible

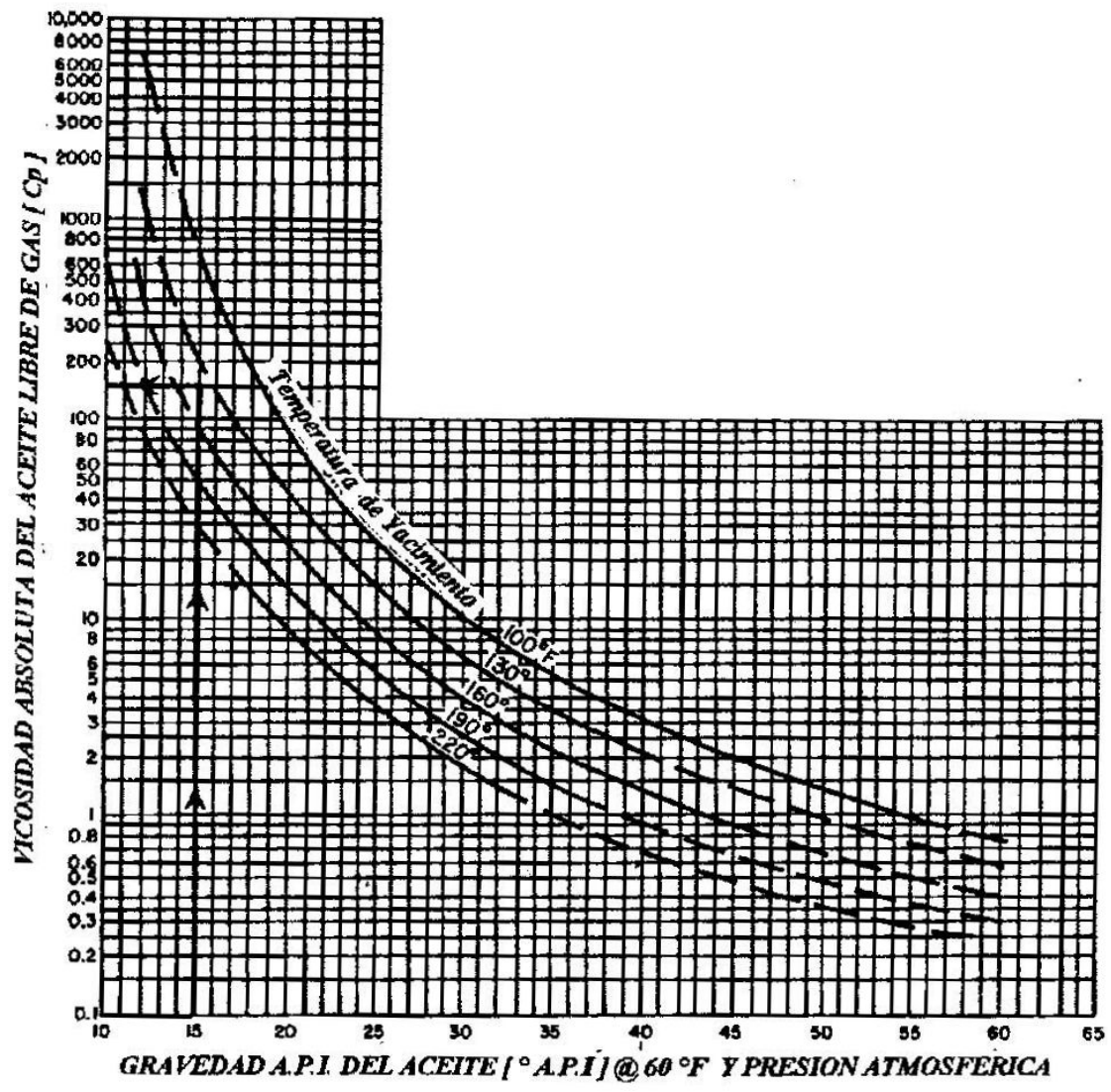


Figura B.8: Viscosidad del aceite muerto
 Fuente: [1] Herramienta software para el diseño del sistema de levantamiento artificial por bombeo electrosumergible

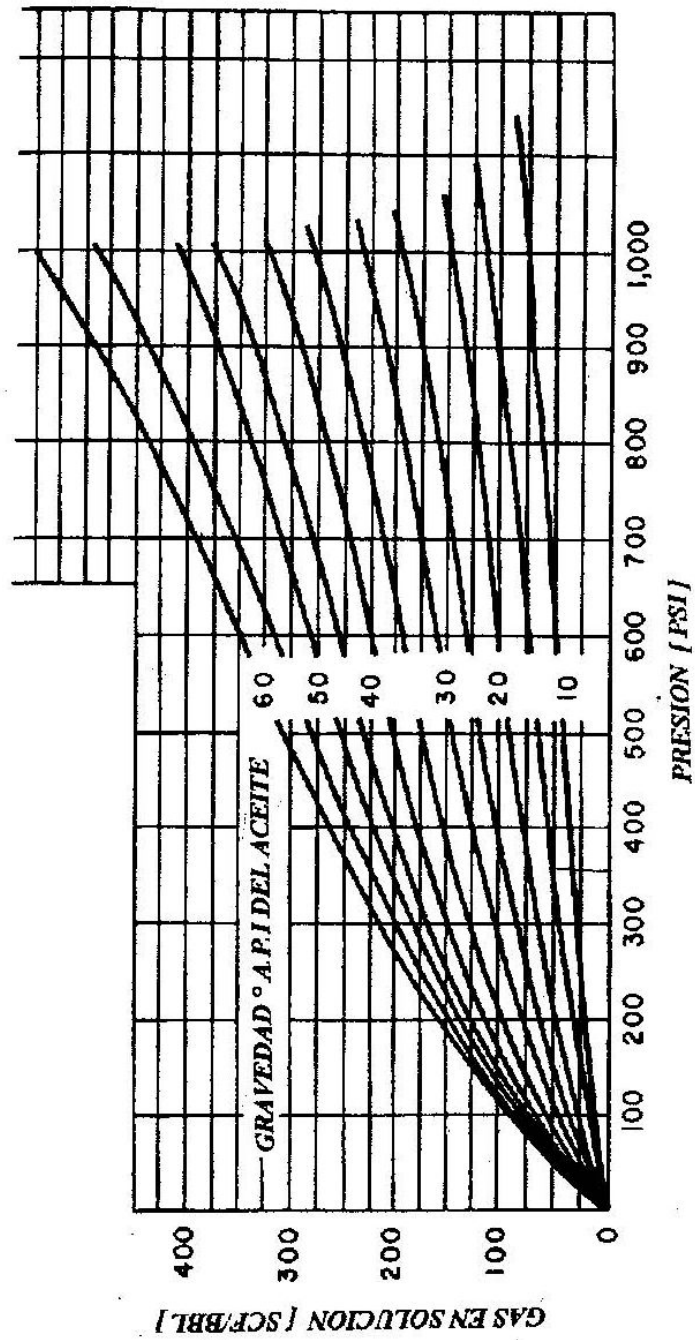


Figura B.9: Gas en solución A.P.I.P.

Fuente: [1] Herramienta software para el diseño del sistema de levantamiento artificial por bombeo electrosumergible

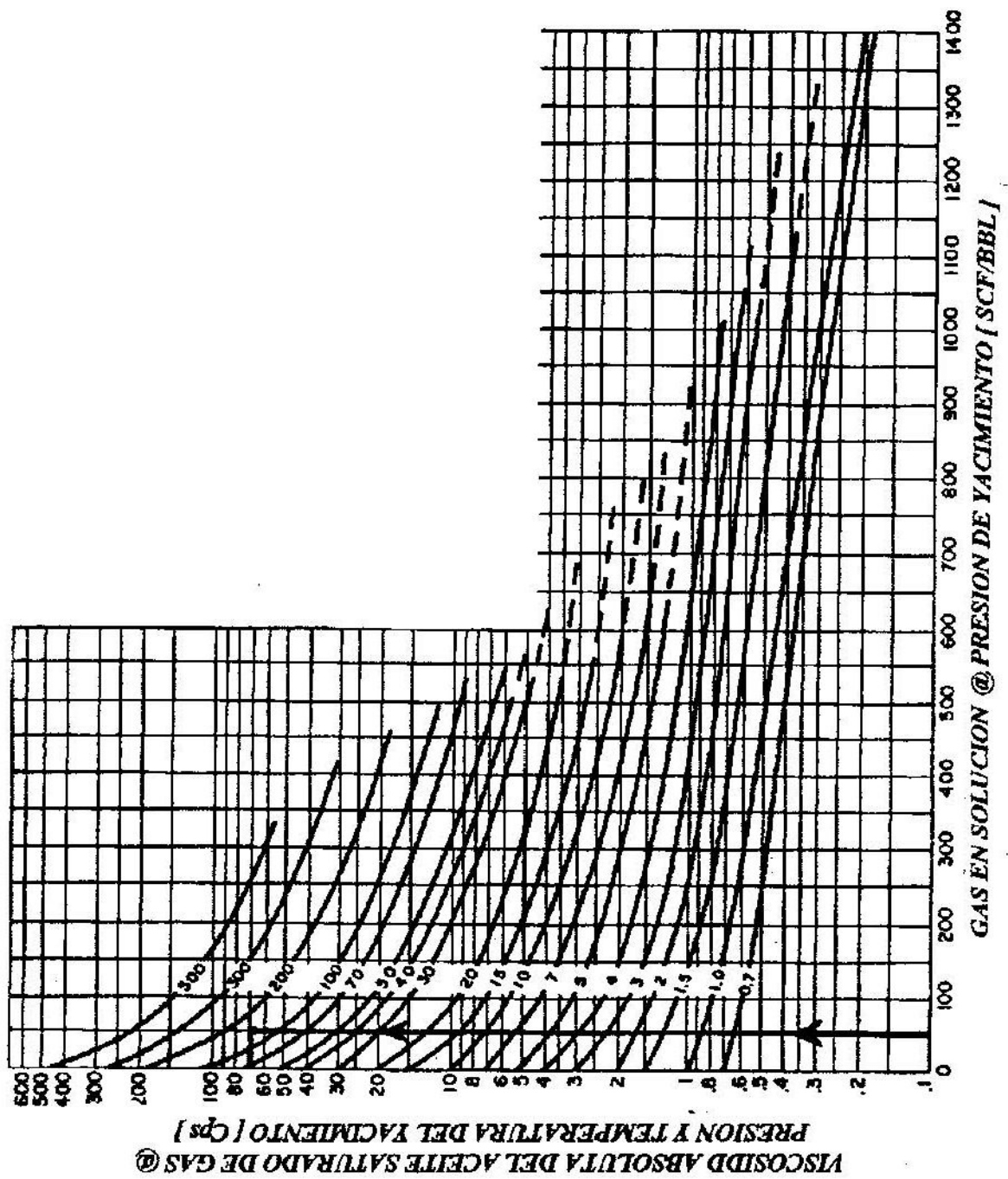


Figura B.10: Viscosidad del aceite vivo
 Fuente: [1] Herramienta software para el diseño del sistema de levantamiento artificial por bombeo electrosumergible

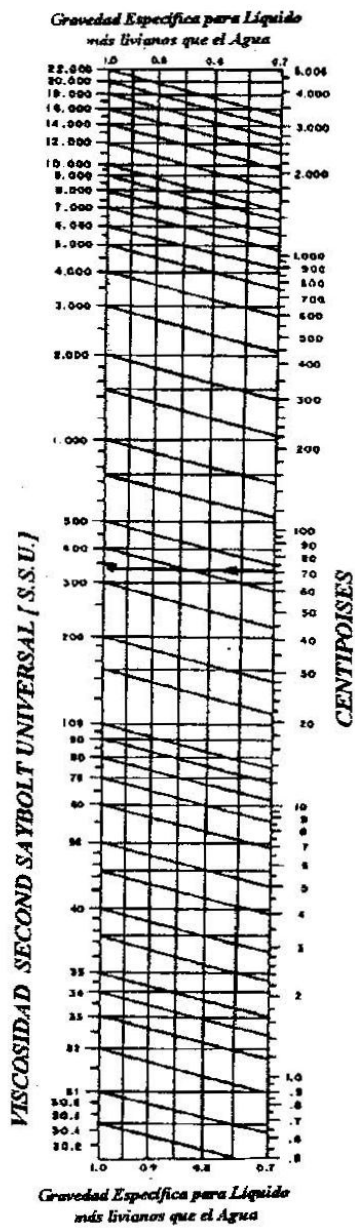


Figura B.11: Conversión de unidades Cp - S.S.U.
 Fuente: [1]Herramienta software para el diseño del sistema de levantamiento artificial por bombeo electrosumergible

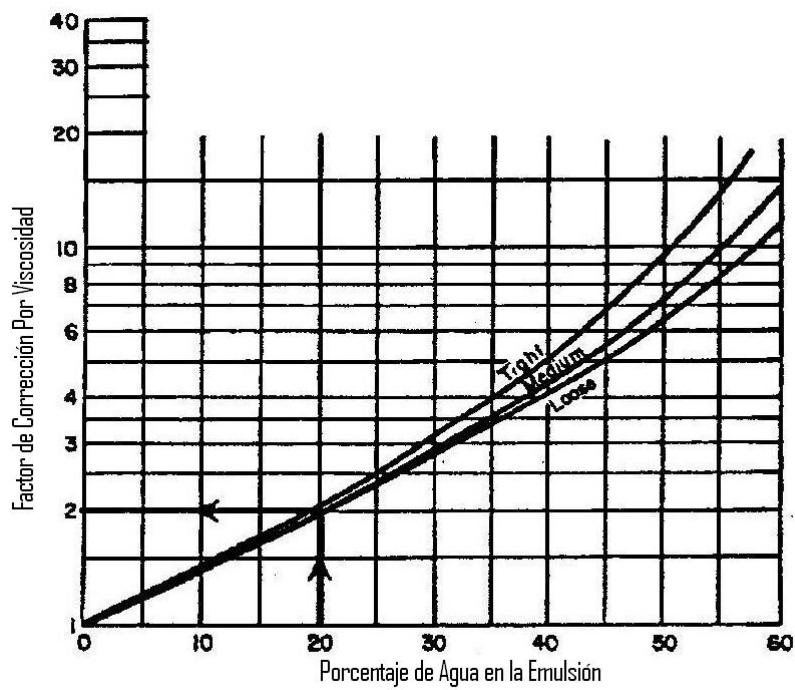


Figura B.12: Efecto de la emulsión sobre la viscosidad del aceite
Fuente: [1] Herramienta software para el diseño del sistema de levantamiento artificial por bombeo electrosumergible

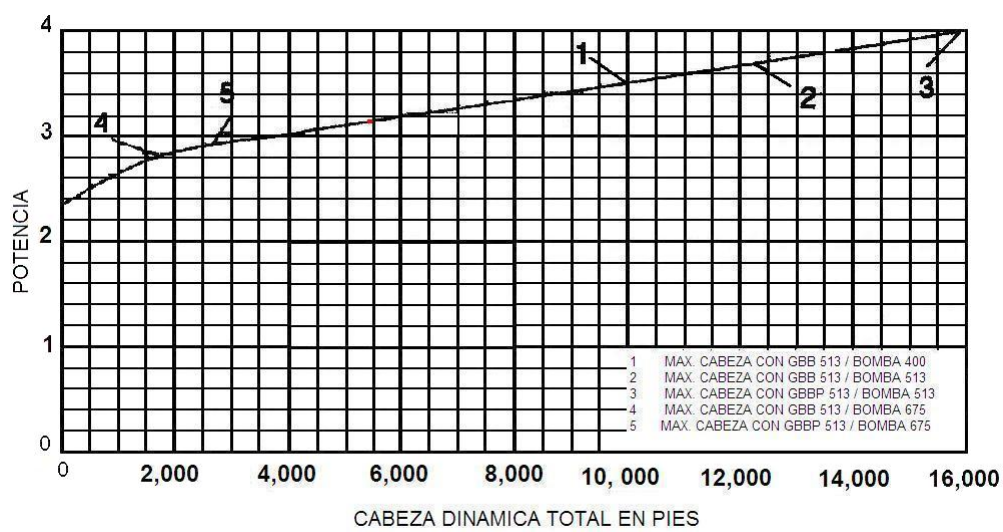


Figura B.13: Requerimiento de potencia de la sección sellante.
Fuente: [1] Herramienta software para el diseño del sistema de levantamiento artificial por bombeo electrosumergible

Apéndice C

Tablas

Cuadro C.1: Especificaciones bomba serie 513

| CARCASA | LONGITUD | PESO | MAX NÚMERO DE ETAPAS | |
|---------|----------|------|----------------------|---------|
| N° | PIES | Lbs | GC-2200 | GC-8200 |
| 6 | 11,3 | 470 | 55 | 29 |
| 7 | 11,8 | 530 | 65 | 34 |
| 8 | 12,3 | 590 | 74 | 39 |
| 9 | 14,3 | 650 | 84 | 44 |
| 10 | 16,3 | 715 | 93 | 49 |
| 11 | 17,8 | 775 | 103 | 54 |
| 12 | 19,3 | 835 | 112 | 59 |
| 13 | 20,8 | 900 | 122 | 64 |
| 14 | 22,3 | 965 | 131 | 69 |
| 15 | 23,8 | 1030 | 141 | 74 |
| 16 | 25,3 | 1095 | 150 | 79 |
| 17 | 26,8 | 1160 | 160 | 84 |
| 18 | 28,3 | 1225 | 170 | 89 |

Bomba para Casing 7 Pulg.O.D:Mínimo

Fuente: [1]Herramienta software para el diseño del sistema de levantamiento artificial por bombeo electrosumergible

Cuadro C.2: Especificaciones motores serie 544

| POTENCIA HP | VOLTS/AMPS | LONGITUD PIES | PESO [Lbs] |
|-------------|------------|---------------|------------|
| 50 | 450/70 | 6,0 | 432 |
| 50 | 780/40 | 6,0 | 432 |
| 50 | 1170/27 | 6,0 | 432 |
| 75 | 845/56 | 8,8 | 624 |
| 75 | 1270/38 | 8,8 | 624 |
| 75 | 1705/28 | 8,8 | 624 |
| 100 | 925/71 | 10,2 | 720 |
| 100 | 1330/49 | 10,2 | 720 |
| 100 | 2130/31 | 10,2 | 720 |
| 125 | 1245/67 | 13,0 | 912 |
| 125 | 1415/54 | 13,0 | 912 |
| 125 | 2150/39 | 13,0 | 912 |
| 150 | 1280/76 | 15,7 | 1096 |
| 150 | 2160/45 | 15,7 | 1096 |

Para Casing de 6 5/8 O:D - 26 Lbs/Pie y más grande

Fuente: [1] Herramienta software para el diseño del sistema de levantamiento artificial por bombeo electrosumergible

Cuadro C.3: Especificaciones motores serie 544

| POTENCIA HP | VOLTS/AMPS | LONGITUD PIES | PESO [Lbs] |
|-------------|------------|---------------|------------|
| 130 | 2145/35 | 14,0 | 1003 |
| 150 | 1250/72 | 15,4 | 1106 |
| 150 | 2210/39 | 15,4 | 1106 |
| 180 | 1230/84 | 18,2 | 1313 |
| 180 | 2210/47 | 18,2 | 1312 |
| 225 | 1230/105 | 22,5 | 1622 |
| 225 | 2145/69 | 25,4 | 1828 |
| 330 | 1935/105 | 33,9 | 2448 |
| 330 | 2455/77 | 33,9 | 2448 |
| 450 | 2460/105 | 45,1 | 3251 |
| 510 | 2810/105 | 50,8 | 3664 |
| 560 | 3160/105 | 56,5 | 4077 |
| 600 | 3520/105 | 62,2 | 4491 |
| 600 | 3870/105 | 67,9 | 4903 |

Para Casing de 7 O:D - 17 Lbs/Pie y más grande

Fuente: [1] Herramienta software para el diseño del sistema de levantamiento artificial por bombeo electrosumergible

Cuadro C.4: Rangos-transformadores monofásicos

| S [kVA] | TENSIÓN PRIMARIO [V] | TENSIÓN SECUNDARIO [V] | ALTURA [Pulg] | DIÁMETRO [Pulg] | PESO [Lbs] |
|---------|----------------------|------------------------|---------------|-----------------|------------|
| 37,5 | 2400/4160 | 912/1310 | 42 | 16 | 625 |
| 37,5 | 7200/12470 | 1250/1750 | 42 | 16 | 625 |
| 37,5 | 14400/24900 | 1900/2500 | 42 | 16 | 625 |
| 50 | 2400/4160 | 912/1310 | 42 | 20 | 810 |
| 50 | 7200/12470 | 1250/1750 | 42 | 20 | 810 |
| 50 | 14400/24900 | 12000/20800 | 42 | 20 | 810 |
| 75 | 2400/4160 | 912/1310 | 46 | 21 | 1025 |
| 75 | 7200/12470 | 1250/1750 | 46 | 21 | 1025 |
| 75 | 14400/24900 | 1900/2500 | 46 | 21 | 1025 |
| 100 | 7200/12470 | 1250/1750 | 48 | 23 | 1050 |
| 100 | 14400/24900 | 1900/2500 | 48 | 23 | 1050 |
| 135 | 7200/12470 | 1250/1750 | 52 | 32 | 1350 |
| 135 | 14400/24900 | 1900/2500 | 52 | 32 | 1350 |

Para una Frecuencia de 60 [Hz]

Fuente: [1] Herramienta software para el diseño del sistema de levantamiento artificial por bombeo electrosumergible

Cuadro C.5: límite de presión de la carcasa

| | | | | | | | | |
|-------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| SERIE | 338 | 387 | 400 | 513 | 562 | 675 | 875 | 1025 |
| PSIG | 4310 | 3380 | 5020 | 4970 | 3510 | 2680 | 4315 | 3054 |

Fuente: [1] Herramienta software para el diseño del sistema de levantamiento artificial por bombeo electrosumergible

Cuadro C.6: Combinaciones de equipo en diferentes casings

| CASING | PESO | SERIES EQUIPO APLICABLE | | | MAX. CABLE RECOMENDADO | | | | | |
|---------|--------|-------------------------|-------|-------|------------------------|-------|-------|---------------|-------|-------|
| | | MOTOR | SELLO | BOMBA | A.P.I.E.U.E | | | A.P.I.N.E.U.E | | |
| O.D | Lb/Pie | | | | 2 3/8 | 2 7/8 | 3 1/2 | 2 3/8 | 2 7/8 | 3 1/2 |
| 4 1/2" | 9,5 | 375 | 338 | 338 | * | | | * | | |
| | 10,5 | | | | * | | | * | | |
| | 11,6 | | | | * | | | * | | |
| 5 1/2" | 17 | 450 | 400 | 400 | 1 | - | - | 1 | 6 | - |
| | 15,5 | | | | 1 | 6 | - | 1 | 4 | - |
| | 14 | | | | 1 | 6 | - | 1 | 4 | - |
| 6 5/8" | 28 | 450 | 400 | 400 | 1 | 1 | 6 | 1 | 1 | 4 |
| | 26 | 450 | 400 | 400 | 1 | 1 | 4 | - | 1 | - |
| | | 544 | 513 | 513 | | | | | | |
| | 24 | 450 | 400 | 400 | 1 | 1 | 4 | 1 | 1 | 1 |
| | | 544 | 513 | 513 | | | | | | |
| 7" | 32 | 450 | 400 | 400 | 1 | 1 | 2 | 1 | 1 | 1 |
| | | 544 | 513 | 513 | | | | | | |
| | | 562 | | | | | | | | |
| | 23 | 450 | 400 | 400 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| | | 544 | 513 | 513 | | | | | | |
| | | 562 | | 562 | | | | | | |
| 8 5/8" | 49 | 450 | 400 | 400 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| | | 544 | 513 | 513 | | | | | | |
| | | 562 | 675 | 562 | | | | | | |
| | | 725 | | 675 | | | | | | |
| 10 3/4" | 55.5 | 450 | 400 | 400 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| | | 544 | 513 | 513 | | | | | | |
| | | 562 | 675 | 562 | | | | | | |
| | | 725 | 875 | 675 | | | | | | |
| | | | | 875 | | | | | | |

Únicamente puede ser empleado con cable plano, a no ser que se use tubing de 2".

Fuente: [1] Herramienta software para el diseño del sistema de levantamiento artificial por bombeo electrosumergible

Cuadro C.7: Especificaciones- variador del motor

| MODELO | MAX. TENSIÓN [V] | MAX. CORRIENTE [A] | MAX. POTENCIA [HP] | MAX. S [kVA] | ALTURA [Pulg] | ANCHO [Pulg] | PROFUNDO [Pulg] |
|--------|------------------|--------------------|--------------------|--------------|---------------|--------------|-----------------|
| 2C-CG | 480 | 50 | 25 | 37 | 53 | 30 | 11 |
| 3C-CG | 480 | 100 | 50 | 75 | 53 | 30 | 11 |
| 4C-CG | 480 | 150 | 100 | 112 | 53 | 30 | 11 |
| 5C-CG | 480 | 300 | 200 | 224 | 53 | 30 | 11 |
| 2B-CG | 1000 | 40 | 40 | 250 | 53 | 30 | 11 |
| 3B-CG | 1000 | 60 | 75 | 270 | 53 | 30 | 11 |
| 3AC-CG | 1500 | 100 | 150 | 300 | 64 | 27 | 19 |
| 4AC-CG | 1500 | 150 | 250 | 350 | 64 | 27 | 19 |
| 6H-CG | 2500 | 300 | 1000 | 692 | 58 | 41 | 34 |
| 7H-CG | 3400 | 300 | 1500 | 794 | 58 | 41 | 34 |
| 8H-CG | 5000 | 300 | 2000 | 1151 | 58 | 41 | 34 |

Fuente: [1] Herramienta software para el diseño del sistema de levantamiento artificial por bombeo electrosumergible

Cuadro C.8: Especificaciones- variadores

| MODELO | SALIDA | | ENTRADA | |
|----------|---------|-------|---------|-------|
| | S [KVA] | C [A] | V [V] | C [A] |
| 2060-3VT | 66 | 79 | 460 | 86 |
| 2075-3VT | 83 | 100 | 460 | 111 |
| 2100-3VT | 111 | 133 | 460 | 148 |
| 2125-3VT | 130 | 156 | 460 | 173 |
| 2150-3VT | 163 | 196 | 460 | 218 |
| 2200-3VT | 200 | 241 | 460 | 268 |
| 2250-3VT | 260 | 313 | 460 | 347 |
| 4300-3VT | 325 | 391 | 460 | 434 |
| 4350-3VT | 390 | 469 | 460 | 521 |
| 4400-3VT | 545 | 546 | 460 | 607 |
| 4500-3VT | 518 | 624 | 460 | 693 |
| 8600-3VT | 700 | 842 | 460 | 705 |
| 8700-3VT | 815 | 983 | 460 | 460 |
| 8800-3VT | 932 | 1123 | 460 | 1125 |

Fuente: [1]Herramienta software para el diseño del sistema de levantamiento artificial por bombeo electrosumergible

Cuadro C.9: Datos de selección de bombas

| SERIE | TIPO | TASA B.E.P [BPD] | RANGO DE OPERACIÓN [BPD] | |
|-------|---------|------------------|--------------------------|-------|
| 338 | DC800 | 800 | 550 | 950 |
| | DC1250 | 1250 | 950 | 1700 |
| 400 | FV320 | 320 | 180 | 460 |
| | FS400 | 400 | 180 | 530 |
| | FC650 | 650 | 450 | 850 |
| | FC925 | 925 | 700 | 1150 |
| | FC1200 | 1200 | 950 | 1550 |
| | FC1600 | 1600 | 1200 | 2100 |
| | FC2200 | 2200 | 1500 | 2800 |
| | FC2700 | 2700 | 1800 | 3500 |
| | FC6000 | 5600 | 3600 | 6800 |
| 513 | GC1700 | 1700 | 1300 | 2200 |
| | GC2200 | 2200 | 1500 | 3000 |
| | GC3000 | 3000 | 2200 | 3600 |
| | GC3500 | 3500 | 2200 | 4700 |
| | GC4100 | 4100 | 2500 | 5600 |
| | GC6100 | 6100 | 3650 | 8100 |
| | GC8200 | 8200 | 4400 | 10300 |
| 562 | KC12000 | 12000 | 9500 | 14500 |
| | KC15000 | 15000 | 11250 | 18750 |
| 675 | HC7000 | 7000 | 4500 | 9000 |
| | HC9000 | 9000 | 6000 | 11500 |
| | HC12000 | 12000 | 7500 | 15000 |
| | HC19000 | 19000 | 12000 | 24500 |
| 875 | IA600 | 21000 | 10300 | 27500 |
| | IB700 | 21000 | 12700 | 32200 |
| 1025 | JA1100 | 36500 | 19200 | 45900 |
| | JB1300 | 43000 | 19900 | 58900 |

Para una frecuencia de operación de 60 [Hz]

Fuente: [1] Herramienta software para el diseño del sistema de levantamiento artificial por bombeo electrosumergible

Cuadro C.10: Nomenclatura del cable

| <i>Componente</i> | <i>Abreviación</i> | <i>Descripción del Material</i> |
|-------------------|--------------------|---|
| Aislante | PPE, P | Copolimero polipropileno |
| | E | Goma EPDM (Etileno Propileno Dieno Metileno) goma |
| | K | Kapton |
| | T | Cinta Semiconductiva (REDASURFACE) |
| Barrera | S | PVDF (Fluoro-poliviniliceno) |
| | TB | Cinta Tedlar |
| | F | Teflon de extrusión FEP |
| | TB | Cinta de alta temperatura |
| | L | Plomo |
| Chaqueta | PE | HDPE (Polietileno de alta densidad) |
| | O | Compuesto de caucho de nitrilo resistente al aceite |
| | E | EPDM, compuesto de caucho |
| Armadura | G | Acero galvanizado |
| | HG | Acero altamente galvanizado |
| | DG | Doble galvanizado |
| | SS | Acero inoxidable |
| | M | Monel |
| | | Perfil estandar |
| | FP | Perfil plano |

Fuente: SCHLUMBERGER -WCP-Artificial Lift System

Cuadro C.11: Capacidad de corriente permisible en conductores aislados para 0 a 2 000 V nominales y 60 °C a 90 °C. No más de tres conductores portadores de corriente en una canalización, cable o tierra (directamente enterrados) y temperatura ambiente de 30 °C.

| Sección transv. | Temperatura nominal del conductor | | | | | | Calibre |
|------------------------|--|---|--|---|---|--|----------------------|
| | 60 °C | 75 °C | 90 °C | 60 °C | 75 °C | 90 °C | |
| | TIPOS TW*, UF* | TIPOS FEPW*, RH*, RHW*, THHW*, THW*, THWN*, XHHW*, USE*, ZW* | TIPOS TBS, SA, SS, FEP*, FEPB*, MI, RHH*, RHW-2, THHN*, THHW*, THW-2*, THWN-2*, USE-2, XHH, XHHW*, XHHW-2, ZW-2 | TIPOS TW*, UF* | TIPOS RH*, RHW*, THHW*, THW*, THWN*, XHHW*, USE* | TIPOS TBS, SA, SS, THHN*, THHW*, THW-2, THWN-2, RHH*, RHW-2, USE-2, XHH, XHHW, XHHW-2, ZW-2 | |
| mm² | COBRE | | | ALUMINIO O ALUMINIO RECUBIERTO DE COBRE | | | AWG o kcmils |
| 0,82 | -- | -- | 14 | -- | -- | -- | 18 |
| 1,31 | -- | -- | 18 | -- | -- | -- | 16 |
| 2,08 | 20* | 20* | 25 | -- | -- | -- | 14 |
| 3,30 | 25* | 25* | 30* | 20* | 20* | 25* | 12 |
| 5,25 | 30 | 35* | 40* | 25 | 30* | 35* | 10 |
| 8,36 | 40 | 50 | 55 | 30 | 40 | 45 | 8 |
| 13,29 | 55 | 65 | 75 | 40 | 50 | 60 | 6 |
| 21,14 | 70 | 85 | 95 | 55 | 65 | 75 | 4 |
| 26,66 | 85 | 100 | 110 | 65 | 75 | 85 | 3 |
| 33,62 | 95 | 115 | 130 | 75 | 90 | 100 | 2 |
| 42,20 | 110 | 130 | 150 | 85 | 100 | 115 | 1 |
| 53,50 | 125 | 150 | 170 | 100 | 120 | 135 | 1/0 |
| 67,44 | 145 | 175 | 195 | 115 | 135 | 150 | 2/0 |
| 85,02 | 165 | 200 | 225 | 130 | 155 | 175 | 3/0 |
| 107,21 | 195 | 230 | 260 | 150 | 180 | 205 | 4/0 |
| 126,67 | 215 | 255 | 290 | 170 | 205 | 230 | 250 |
| 152,01 | 240 | 285 | 320 | 190 | 230 | 255 | 300 |
| 177,34 | 260 | 310 | 350 | 210 | 250 | 280 | 350 |
| 202,68 | 280 | 335 | 380 | 225 | 270 | 305 | 400 |
| 253,35 | 320 | 380 | 430 | 260 | 310 | 350 | 500 |
| 304,02 | 355 | 420 | 475 | 285 | 340 | 385 | 600 |
| 354,69 | 385 | 460 | 520 | 310 | 375 | 420 | 700 |
| 380,02 | 400 | 475 | 535 | 320 | 385 | 435 | 750 |
| 405,36 | 410 | 490 | 555 | 330 | 395 | 450 | 800 |
| 456,03 | 435 | 520 | 585 | 355 | 425 | 480 | 900 |
| 506,70 | 455 | 545 | 615 | 375 | 445 | 500 | 1.000 |
| 633,38 | 495 | 590 | 665 | 405 | 485 | 545 | 1.250 |
| 760,05 | 520 | 625 | 705 | 435 | 520 | 585 | 1.500 |
| 886,73 | 545 | 650 | 735 | 455 | 545 | 615 | 1.750 |
| 1.013,40 | 560 | 665 | 750 | 470 | 560 | 630 | 2.000 |
| FACTORES DE CORRECCIÓN | | | | | | | |
| Temp. ambiente en °C | Para temperaturas ambientes distintas de 30°C, multiplicar las anteriores corrientes por el correspondiente factor de los siguientes | | | | | | Temp. ambiente en °C |
| 21-25 | 1,08 | 1,05 | 1,04 | 1,08 | 1,05 | 1,04 | 21-25 |
| 26-30 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 26-30 |
| 31-35 | 0,91 | 0,94 | 0,96 | 0,91 | 0,94 | 0,96 | 31-35 |
| 36-40 | 0,82 | 0,88 | 0,91 | 0,82 | 0,88 | 0,91 | 36-40 |
| 41-45 | 0,71 | 0,82 | 0,87 | 0,71 | 0,82 | 0,87 | 41-45 |
| 46-50 | 0,58 | 0,75 | 0,82 | 0,58 | 0,75 | 0,82 | 46-50 |
| 51-55 | 0,41 | 0,67 | 0,76 | 0,41 | 0,67 | 0,76 | 51-55 |
| 56-60 | | 0,58 | 0,71 | | 0,58 | 0,71 | 56-60 |
| 61-70 | | 0,33 | 0,58 | | 0,33 | 0,58 | 61-70 |
| 71-80 | | | 0,41 | | | 0,41 | 71-80 |

Fuente: [14] Código Eléctrico Colombiano - NTC 2050

Apéndice D

Manual del usuario

Introducción

El presente documento tiene como finalidad brindar una ayuda a los futuros usuarios de la herramienta software desarrollada. Guiándolos en su manejo, así como explicar el funcionamiento de ciertas funciones o características contenidas en la misma.

D.1. Instalación

Requerimientos:

Con el fin de garantizar el correcto funcionamiento de la herramienta software desarrollada. Existen una serie de requerimientos mínimos aconsejados.

Hardware:

- Procesador AMD Sempron 2800+1.60 GHz o superiores
- Memoria RAM de 1 GB

Software:

- Microsoft Windows XP
- Matlab R2008b
- ATPDraw. En caso de no poseer una versión del ATP. esta viene incluida en el CD de instalación.

D.2. Procedimiento de instalación

D.2.1. metodoliagía uno

La sección anterior hace mención sobre los programas básicos necesarios para el buen funcionamiento de la herramienta. Como son el MATLAB y el ATPDraw. A continuación se presenta una descripción general sobre la instalación de los mismos, dado el caso que el usuario no los tenga ya instalados en su computador y además se indican los pasos a seguir para la instalación correcta de esta herramienta software.

Para el Matlab, el usuario deberá tener en cuenta que cualquier versión de Matlab anterior a la recomendada probablemente genere errores en la ejecución de la herramienta software. Por otra parte, la instalación del Matlab es sencilla y únicamente requiere la introducción del DVD de instalación en la bandeja de la unidad de DVD's del computador y seguir las instrucciones que el automáticamente indique.

D.2.2. metodoliagía dos

A continuación se presenta una descripción general sobre la instalación de un ejecutable de la herramienta software BES_UIS, donde se indican los pasos a seguir para la instalación correcta de esta herramienta.

Se guarda la carpeta "BES_UIS_WIN 32" en el escritorio del computador, se abre esta carpeta la cual contiene dentro de ella las siguientes carpetas "distrib" y

“src”, se continua haciendo doble clic en la carpeta “distrib” para abrirla y llegar al ejecutable que tiene como “MCRInstaller” al cual se le da doble clic y abre una ventana con nombre “C:\Documents and settings\Administrador\Escritorio\BES_UIS_WIN_32\distrib\MCRInstaller”, se una ventana llamada “choose setup language” se da clic en el botón “ok” y esto genera que se abra otra ventana con nombre “InstallShield Wizard” donde se debe hacer clic en el botón “Install” se debe espera un corto tiempo hasta que se abra una ventana de Matlab y se debe seguir las instrucciones que el automáticamente indique.

Dependiendo de la metodoliagía utilizada se debe continuar con la instalación de ATP.

En el caso del ATP, el CD de instalación de ésta herramienta software, lleva integrado una carpeta con el nombre de instalatp la cual en su interior posee dos archivos .exe; los cuales deberán ser ejecutados en el siguiente orden e instalados en la unidad de disco o disco local C:\ATP del computador a ser implementados.

1. Ejecutando el archivo instatp114_basic.exe; el cual muestra la ventana de instalación. A continuación se pulsa el botón “Next >” que abre la ventana donde se observa la dirección donde debe ser instalado el ATP. Seguidamente se pulsa el botón “Install”, dando fin a la primera fase de la instalación del ATP.
2. Se ejecuta el archivo instatp114_add.exe; el cual muestra una ventana con una serie de elementos adicionales del ATP. pulsando el botón “Install”, estos serán anexados a la versión de ATP ya instalada se actualiza a una versión más reciente.

Teniendo ya instalados los programas de Matlab y ATP, se debe copiar la carpeta “proyecto” en el disco local o unidad de disco C:\ y el archivo “pl42mat.exe” que viene en el CD en la dirección C:\ATP\tools. En ese mismo directorio se abre el archivo “ATPLnch.ini” y se cambia el valor de la propiedad “closewindow=0” a “closewindow=1” y se guarda. Otra forma de realizar este cambio es ejecutando el ATP Launcher; para lo cual se debe hacer doble clic sobre el

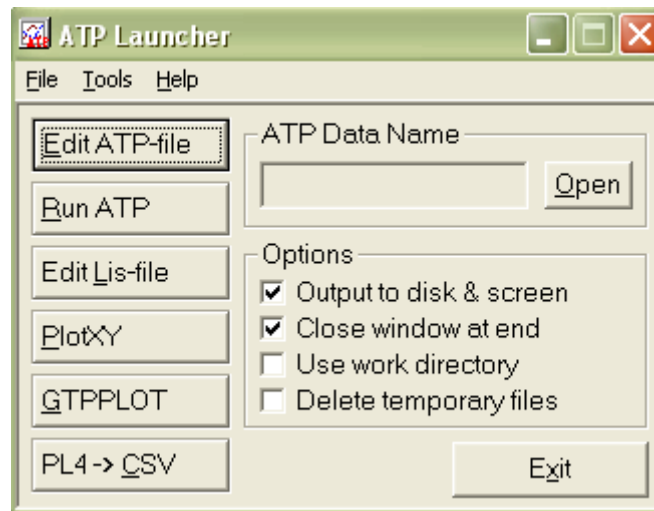


Figura D.1: ATP Launcher
Fuente: Autores

icono ATPLnch que se encuentra en el directorio C:\ATP\tools, ejecutándolo directamente desde el ATPDraw o a través del botón “inicio” del computador y señalar todos los programas - ATP - ATP Launcher. Y se verifica que la casilla “Close window at end” se encuentre marcada como muestra la figura (D.1) y se cierra. Esto se hace con el fin de evitar la solicitud de oprimir una tecla cada vez que termina una simulación por parte del ATP.

Luego se inicia Matlab y se adiciona la carpeta “proyecto” al set path de Matlab. Para lo cual hay que dirigirse a la pestaña Archivo de Matlab, se selecciona la opción “set path”, se escoge “Add with subfolders”, seguido se pulsan los botones “save” y “close”. Para ejecutar cada vez que se desee la herramienta software, se debe iniciar sección en Matlab, escribir “BES_UIS” en el “Command Window” y pulsar la tecla Enter.

D.3. Manejo de la herramienta software

Antes de poder utilizar la herramienta software para la especificación del motor empleado en el sistema de bombeo electrosumergible de crudo; es necesario conocer una serie de información sobre el pozo al que se le desea instalar el

sistema B.E.S.

D.3.1. Recopilación de datos

La información que se recopila del pozo puede dividirse en cuatro categorías principales que son¹:

1. Datos de pozo

O.D Casing = 7 Pulgadas (0,1778 m)

O.D. Tubing = 2 7/8 Pulgadas (113,19 m) Nuevo

Perforaciones = 5300 - 5400 Pies (1615,44 - 1645,92 m)

Profundidad de asentamiento de la bomba = 5200 Pies (1584,96 m)

2. Datos de producción

Presión de cabeza en tubing = 150 PSIG

Tasa de prueba = 900 BPD

Punto medio de perforaciones = 5350 Pies (1630,68 m)

Presión de prueba = 985 PSIG

Presión estática del fondo del pozo = 1650 PSIG

Temperatura de fondo de pozo = 150 °F (65,56 °C)

Relación gas- aceite = 50 Scf/stb

Corte de agua = 90 %

Tasa de producción deseada = 2000 BPD

3. Condiciones del fluido del pozo

Gravedad específica del agua = 1,02

Gravedad A:P:I del aceite = 30 (0,876)

¹Los datos presentados en el presente documento hacen referencia al caso tipo que se tomo como guía para el desarrollo de la Herramienta y verificar sus resultados.

BES UIS

Archivo Terminar Instalación Ayuda

Presentación **Bombeo** Motor Transformador Cable Simulación

Datos de entrada

DATOS DEL POZO

| | |
|--------------------|------------------|
| O.D. Casing [in] | Profundidad [ft] |
| 7 | 5200 |
| Perforaciones [ft] | O.D. Tubing [in] |
| 5300 | 2.875 |

Tubing:

Nuevo Viejo

DATOS DE PRODUCCION

| | | |
|--|---------------------|------------------|
| Pres. Tubing [psi] | T. Prueba [BPD] | PMP [ft] |
| 150 | 900 | 5350 |
| Pres. Prueba [psi] | Pres. F. Pozo [psi] | Produccion [BPD] |
| 985 | 1650 | 2000 |
| Gas-Acete | Corte de Agua % | Temperatura [°F] |
| 50 | 90 | 150 |
| Pres de Punto de burbuja del gas [psi] | | |
| 0 | | |

CONDICIONES DEL FLUIDO DEL POZO

| | |
|-------------------|---------------------|
| Gravedad del Agua | Gravedad del Aceite |
| 1.02 | 0.876 |
| Gravedad del Gas | |
| | 30 |
| | 0 |

FUENTE DE ENERGIA

| | |
|----------|--------|
| Vred [V] | f [Hz] |
| 13800 | 60 |

Resultados

| | | | | |
|--------------------------|--------------------------------|-----------------------------|------------------------------|----------------------------|
| Temp. de Operación [°F] | Pres. Máx. Cabeza [psi] | Imin del Conductor [A] | Cal. del Conductor [AWG] | Ejecutar |
| 155 | 2628 | 62.1 | | |
| Per. Fricción [ft] | Pres. lim. de la carcaza [psi] | Vel. Real del Fluido [ft/s] | Per. en el Cable [V/1000 ft] | Shom. del Variador [kVA] |
| 31 | 4970 | 1.91 | | |
| N° Etp de la Bomba | % de carga del eje | Etf de la Bomba % | Factor de corrección. | % de Carga del Controlador |
| 112 | 29.9624 | 70 | | |
| Pot. Bomba [HP] | % de la carga del Fluido | Vnom. del Motor [kV] | V Sup. [V] | S Total [kVA] |
| 121 | 52 | 1.415 | | |
| % de carga de la Carcaza | Cabeza T. Máx. [ft] | Inom. del Motor [A] | % Caída de Tensión | Cargar |
| 56.9014 | 6496 | 54 | | |

BOMBA

| | | | | |
|---------------|-------|----------------------------|----------------------------|----------------------|
| Tipo de Bomba | Serie | Pot. lim. de la Bomba [HP] | Cap. de la Cabeza [ft/Etp] | Máx. Cabeza [ft/Etp] |
| GC2200 | 513 | 405 | 49.7 | 58 |

Figura D.2: Pestaña Bombeo con los datos recopilados del pozo
Fuente: Autores

4. Fuente de energía eléctrica

Tensión primaria disponible 7967/13800 V

Frecuencia = 60 Hz

D.3.2. Ingreso de los datos de entrada y ejecución de la herramienta

Ya obtenida la información básica de las condiciones del pozo, se procede a introducirla en la pestaña “Bombeo” de la herramienta software como se muestra en la figura D.2.

Este primer paso permite la implementación de Tubing nuevo o viejo según las posibilidades de cada diseño o criterio del usuario. Además permite el ingreso de otros datos como presión de punto y gravedad del gas que se hace necesaria en pozos con un alto contenido de gas.

Una vez ingresados los datos del pozo en la pestaña “Bombeo” se procede a dar clic en el botón “Ejecutar” ubicado en la esquina inferior derecha del panel “Datos de Entrada” de la pestaña “Bombeo”, dando inicio a la ejecución de la herramienta.

Determinación de la bomba

Iniciada la ejecución de la herramienta, se despliega la ventana “Selección Bomba”, donde aparece como primera medida un listado de las series de las bombas que cumplen con el criterio de la producción que se desea obtener al final del diseño.

Ya seleccionada una de las bombas presentadas en la interfaz, se da inicio a un nuevo ingreso de datos que deben ser leídos de forma directa por el usuario de una serie de gráficas y tablas provistas por los fabricantes.

1. límite de potencia del eje

Con la serie y tipo de bomba ya seleccionados.

Bomba: serie 513 - GC2200

El usuario debe escoger un tipo de eje que puede ser normal, intermedio o de alta resistencia.

Tipo de eje: Intermedio

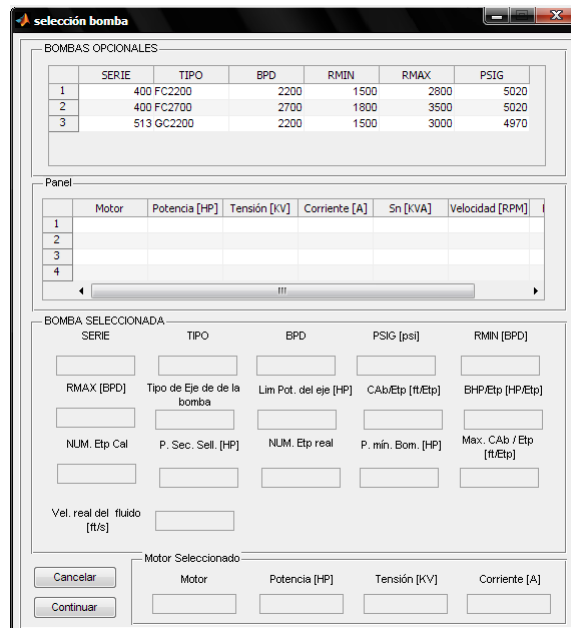


Figura D.3: Ventana Selección Bomba
Fuente: Autores

Ya escogido el eje y con el valor de la frecuencia de operación, se debe leer la potencia límite del eje de la bomba en la gráfica de límite de potencia del eje de la bomba que corresponda con la selección de eje y serie de la bomba.

Potencia límite del eje de la bomba = 405 HP tomado de la figura B.3

2. Cabeza/Etapa y el BHP/etapa a la tasa de producción deseada

Tasa de producción deseada de 2000 BPD

Se ingresa el valor cabeza\etapa tomado de la gráfica B.2 de comportamiento de la etapa de una bomba para el valor de la tasa de producción deseada. Correspondiente con diámetro del casing y la serie de la bomba seleccionada.

cabeza\etapa: 49,7

BHP/etapa: 1,05

3. Número de etapas reales de la bomba

A partir de las tablas de especificaciones suministradas por el fabricante, se observa el valor real del número de etapas que puede contener la bomba según su serie y tipo seleccionado. Así como del casing disponible.

Número de etapas calculado por la herramienta: 110

Número de etapas disponibles realmente: 112 tomado de la tabla C.1

4. Selección de la sección sellante y del motor.

El requerimiento de potencia de la sección sellante depende de la cabeza dinámica total producida por la bomba.

TDH: 5464 Pies (1665.43 m)

De la gráfica B.13 de requerimiento de potencia de la sección sellante correspondiente con la serie de la sección sellante seleccionada²:

P. Sec. Sell (Potencia requerida por la sección sellante): 3,17 HP

5. Selección del motor.

Una vez determinada la potencia mínima requerida por la bomba en la herramienta software.

POT. Min. BOM: 121,43 HP

Se selecciona uno de los motores que aparecen listados dentro del panel de motores, dentro de la ventana "Selección Bomba".

Motor: 544-1425-54³ (125 HP, 1415 V, 54 A)

6. Límites de carga

- Presión de la carcasa

Con la serie de la bomba seleccionada y el límite de presión de la carcasa. Se determina la máxima cabeza que desarrolla la bomba seleccionada cuando el caudal de producción sea cero. Para lo cual se

²Normalmente la serie de la sección sellante coincide con la serie de la bomba aunque existen excepciones que requieren adaptadores especiales.

³El nombre de los motores en la herramienta software está formado de la siguiente forma: Serie-Tensión nominal-Corriente nominal

hace necesario revisar nuevamente la gráfica B.2 de comportamiento de la etapa de una bomba. Donde se toma el máximo cabezal\etapa a caudal cero

El porcentaje de carga se determina por las ecuaciones

Bomba serie: 513

Presión límite de la carcasa: 4970 PSIG tomado de la tabla C.5

Max. Cab / Etp: 58 Pies/Etapa tomado de la figura B.2

■ Determinación de la carga de la bomba

Con el diámetro externo del casing, la serie del motor seleccionado y con el caudal de producción deseado, se determina la velocidad del fluido que pasa por el motor de la figura B.4 velocidad del fluido pasando por el motor.

Diámetro externo del casing: 7"

Motor serie: 544

Caudal de producción deseada: 2000 BPD

Vel. real del fluido: 1,91 Pies/s

Se hace clic en el botón "Continuar" ubicado en la esquina inferior izquierda de la ventana.

% de carga de la carcasa: 56.90 %

% de la carga del fluido: 52 %

V_{nom} del motor: 1,415 kV

I_{nom} del motor: 54 A

I_{min} del conductor⁴: 62,1 A

⁴Es la corriente mínima que debe ser capaz de soportar el cable de alimentación del motor a la temperatura ambiente de operación.

selección bomba

BOMBAS OPCIONALES

| | SERIE | TIPO | BPD | RMIN | RMAX | PSIG |
|---|-------|--------|------|------|------|------|
| 1 | 400 | FC2200 | 2200 | 1500 | 2800 | 5020 |
| 2 | 400 | FC2700 | 2700 | 1800 | 3500 | 5020 |
| 3 | 513 | GC2200 | 2200 | 1500 | 3000 | 4970 |

Panel

| | Motor | Potencia [HP] | Tensión [KV] | Corriente [A] | Sn [KVA] | Velocidad [RPM] |
|---|-------------|---------------|--------------|---------------|----------|-----------------|
| 1 | 544-1245-67 | 125 | 1.2450 | 67 | 144.4790 | 3565 ▲ |
| 2 | 544-1415-54 | 125 | 1.4150 | 54 | 132.3460 | 3565 ▬ |
| 3 | 544-2150-39 | 125 | 2.1500 | 39 | 145.2320 | 3565 ▼ |
| 4 | 544-1280-76 | 150 | 1.2800 | 76 | 168.4940 | 3565 ▼ |

BOMBA SELECCIONADA

| SERIE | TIPO | BPD | PSIG [psi] | RMIN [BPD] |
|-----------------------------|----------------------------|-----------------------|-------------------|-------------------------|
| 513 | GC2200 | 2200 | 4970 | 1500 |
| RMAX [BPD] | Tipo de Eje de de la bomba | Lim Pot. del eje [HP] | CAb/Etp [ft/Etp] | BHP/Etp [HP/Etp] |
| 3000 | intermedio | 405 | 49.7 | 1.05 |
| NUM. Etp Cal | P. Sec. Sell. [HP] | NUM. Etp real | P. mín. Bom. [HP] | Max. CAb / Etp [ft/Etp] |
| 110 | 3.17 | 112 | 121.4286 | 58 |
| Vel. real del fluido [ft/s] | 1.91 | | | |

Motor Seleccionado

| Motor | Potencia [HP] | Tensión [KV] | Corriente [A] |
|-------------|---------------|--------------|---------------|
| 544-1415-54 | 125 | 1.415 | 54 |

Figura D.4: Ventana Selección Bomba
Fuente: Autores

BES UIS
 Archivo Terminar Instalación Ayuda

Presentación **Bombeo** Motor Transformador Cable Simulación

Datos de entrada

| DATOS DEL POZO | | DATOS DE PRODUCCION | | | CONDICIONES DEL FLUIDO DEL POZO | | |
|--|------------------|--|---------------------|------------------|---------------------------------|---------------------|----|
| O.D.Casing [in] | Profundidad [ft] | Pres. Tubing [psi] | T. Prueba [BPD] | PMP [ft] | Gravedad del Agua | Gravedad del Aceite | |
| 7 | 5200 | 150 | 900 | 5350 | 1.02 | 0.876 | 30 |
| Perforaciones [ft] | O.D. Tubing [in] | Pres. Prueba [psi] | Pres. F. Pozo [psi] | Produccion [BPD] | Gravedad del Gas | 0 | |
| 5300 | 2.875 | 985 | 1650 | 2000 | | | |
| Tubing | | Gas-Aceite | Corte de Agua % | Temperatura [°F] | FUENTE DE ENERGIA | | |
| <input checked="" type="radio"/> Nuevo <input type="radio"/> Viejo | | 50 | 90 | 150 | Vred [V] | f [Hz] | |
| | | Pres de Punto de burbuja del gas [psi] | | | 13800 | 60 | |
| | | 0 | | | | | |

Resultados

| | | | | |
|--------------------------|--------------------------------|-----------------------------|------------------------------|----------------------------|
| Temp. de Operación [°F] | Pres. Máx. Cabeza [psi] | Imin del Conductor [A] | Cal. del Conductor [AWG] | Ejecutar |
| 155 | 2628 | 62.1 | | |
| Per. Fricción [ft] | Pres. lim. de la carcaza [psi] | Vel. Real del Fluido [ft/s] | Per. en el Cable [V/1000 ft] | Snom. del Variador [kVA] |
| 31 | 4970 | 1.91 | | |
| N° Etp de la Bomba | % de carga del eje | Eff de la Bomba % | Factor de corrección. | % de Carga del Controlador |
| 112 | 29.9824 | 70 | | |
| Pot. Bomba [HP] | % de la carga del Fluido | Vnom. del Motor [kV] | V Sup. [V] | S Total [kVA] |
| 121 | 52 | 1.415 | | |
| % de carga de la Carcaza | Cabeza T. Máx. [ft] | Inom. del Motor [A] | % Caída de Tensión | Cargar |
| 56.9014 | 6496 | 54 | | |
| BOMBA | | | | |
| Tipo de Bomba | Serie | Pot. lim. de la Bomba [HP] | Cap. de la Cabeza [ft/Etp] | Máx. Cabeza [ft/Etp] |
| GC2200 | 513 | 405 | 49.7 | 58 |

Figura D.5: Pestaña Bombeo esperando la determinación del calibre del cable de alimentación del motor

Fuente: Autores

7. Determinación del cable de potencia

Según la tabla C.11 de corriente máxima permisible para los cables; los conductores a partir del calibre N° 6 AWG soportan la corriente de 62,1 A. Que al ser corregida por su temperatura ambiente de trabajo de como resultado una corriente de:

$$I_{conductor} = 0,58 \times 75 A = 43,5 A$$

Con lo cual el calibre N° 6 AWG no cumple con los requerimientos de trabajo. Con ayuda de la corriente mínima que debe soportar el conductor y el factor de corrección tomado de las tablas provistas por los fabricantes o normas técnicas C.11. Se encuentra el valor mínimo real que debe soportar el conductor a una temperatura ambiente normal de trabajo de 30 °C u 86 °F.

$$I_{tablas} = \frac{I_{conductor} A}{F_{corrección\ por\ temperatura}} = \frac{62,1 A}{0,58} = 107,069 A$$

Para el caso ejemplo que se viene siguiendo, los conductores que cumplen con esta corriente comienzan partir del calibre N° 3 AWG (Cobre). Revisando la gráfica B.5 provista por los fabricantes para la caída de tensión por cada 1000 ft. El Calibre N° 3 no se encuentra contemplado. Por tanto se debe tomar el calibre siguiente por encima en capacidad de corriente.

El cable N° 2 AWG, tiene una caída de tensión de 15,8 V/1000 Pies a 20 °C ó 68 °F. Que debe ser corregida a la temperatura ambiente de operación de 156 °F (68,89 °C).

Factor de corrección para una temperatura 156 °F (68,89 °C) es de 1,1922, siendo éste el último dato en ser ingresado dentro de la pestaña "Bombeo".

Determinación del Variador

Ya ingresado el factor de corrección para la temperatura se despliega una ventana que contiene la lista de variadores de la base de datos que cumplen con

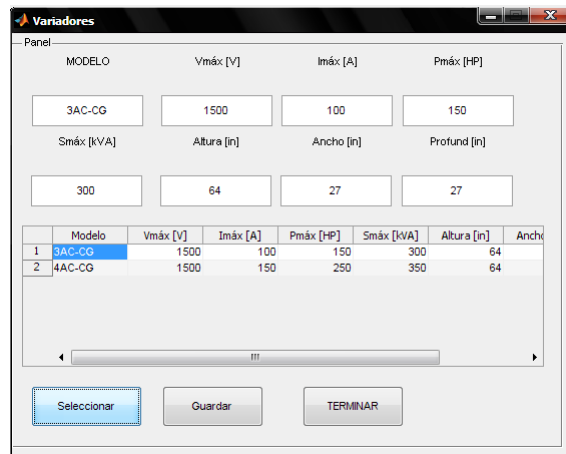


Figura D.6: Pestaña selección variador.
Fuente: Autores

los requerimientos del sistema. La selección del variador del motor se basa en la tensión en la superficie, la corriente del motor, y los kVA totales del sistema.

Se selecciona el variador 3AC-CG (1500 V, 150 A, 300 kVA), para cargar los datos del variador escogido en la pestaña de "Bombeo" se da clic en el botón "Seleccionar" ,al finalizar se realiza clic al botón "Terminar" que se encarga de cerrar la pestaña de "Variador".

Posteriormente para finalizar el proceso de selección de la bomba, se hace clic sobre el botón "Cargar" ubicado en la esquina inferior derecha de la pestaña "Bombeo".

BES_UIS

Archivo Terminar Instalación Ayuda

Presentación **Bombeo** Motor Transformador Cable Simulación

Datos de entrada

DATOS DEL POZO

O.D.Casing [in] Profundidad [ft]

Perforaciones [ft] O.D. Tubing [in]

Tubing
 Nuevo Viejo

DATOS DE PRODUCCION

Pres. Tubing [psi] T. Prueba [BPD] PMP [R]

Pres. Prueba [psi] Pres. F. Pozo [psi] Produccion [BPD]

Gas-Aceite Corte de Agua % Temperatura [°F]

Pres de Punto de burbuja del gas [psi]

CONDICIONES DEL FLUIDO DEL POZO

Gravedad del Agua Gravedad del Aceite

Gravedad del Gas

FUENTE DE ENERGIA

Vred [V] f [Hz]

Resultados

| | | | | |
|--|---|--|---|---|
| Temp. de Operación [°F] <input type="text" value="155"/> | Pres. Máx. Cabeza [psi] <input type="text" value="2628"/> | Imin del Conductor [A] <input type="text" value="62.1"/> | Cal. del Conductor [AWG] <input type="text" value="2"/> | <input type="button" value="Ejecutar"/> |
| Per. Fricción [ft] <input type="text" value="31"/> | Pres. lim. de la carcaza [psi] <input type="text" value="4970"/> | Vel. Real del Fluido [ft/s] <input type="text" value="1.96"/> | Per. en el Cable [V/1000 ft] <input type="text" value="15.8"/> | Snom. del Variador [kVA] <input type="text" value="300"/> |
| Nº Etp de la Bomba <input type="text" value="112"/> | % de carga del eje <input type="text" value="29.9651"/> | Eff de la Bomba % <input type="text" value="70"/> | Factor de corrección. <input type="text" value="1.1922"/> | % de Carga del Controlador <input type="text" value="47"/> |
| Pot. Bomba [HP] <input type="text" value="121"/> | % de la carga del Fluido <input type="text" value="51"/> | Vnom. del Motor [kV] <input type="text" value="1.415"/> | V Sup. [V] <input type="text" value="1515.7767"/> | S Total [kVA] <input type="text" value="142"/> |
| % de carga de la Carcaza <input type="text" value="56.9014"/> | Cabeza T. Máx. [ft] <input type="text" value="6496"/> | Inom. del Motor [A] <input type="text" value="54"/> | % Caída de Tensión <input type="text" value="6.6485"/> | <input type="button" value="Cargar"/> |
| BOMBA | | | | |
| Tipo de Bomba <input type="text" value="GC2200"/> | Serie <input type="text" value="513"/> | Pot. lim. de la Bomba [HP] <input type="text" value="405"/> | Cap. de la Cabeza [ft/Etp] <input type="text" value="49.7"/> | Máx. Cabeza [ft/Etp] <input type="text" value="58"/> |

Figura D.7: Pestaña Bombeo con todos sus cálculos y respuestas realizadas.

Fuente: Autores

BES UIS

Archivo Terminar Instalación Ayuda

Presentación Bombeo **Motor** Transformador Cable Simulación

Datos de entrada

| | | | | |
|-------------|-----------------|--------------------|-----------------------|---------------------|
| Nº de polos | Frecuencia [Hz] | Velocidad [RPM] | Par de arranque [p.u] | I de arranque [p.u] |
| 2 | 60 | 3565 | 1.75 | 8 |
| Vn [kV] | In [A] | Factor de potencia | Pn [HP] | Eficiencia [p.u] |
| 1.415 | 54 | 0.85 | 125 | 0.979 |

Panel de control

Determinar parametros

mediante el programa IMD del ATP

ingresando los parametros del motor

Tipo de rotor del Motor
SINGLE

determinar parametros

Curvas Caracteristicas

Par Vs Velocidad

determinar Curvas

Panel Datos

Ver base de datos de los motores

Guardar

Datos Motores

| | Motor | P [HP] | Vn [kV] | In [A] | Sn [KVA] | V [RPM] | Tarr [p.u] | Iarr [p.u] | fp | Eff % | f [Hz] | Nº de Polos (P) |
|----|-------------|--------|---------|--------|----------|---------|------------|------------|--------|---------|--------|-----------------|
| 1 | 544-450-70 | 50 | 0.4500 | 70 | 54.5596 | 3565 | 1.7500 | 8 | 0.8500 | 97.9000 | 60 | |
| 2 | 544-780-40 | 50 | 0.7800 | 40 | 54.0400 | 3565 | 1.7500 | 8 | 0.8500 | 97.9000 | 60 | |
| 3 | 544-1170-27 | 50 | 1.1700 | 27 | 54.7155 | 3565 | 1.7500 | 8 | 0.8500 | 97.9000 | 60 | |
| 4 | 544-845-56 | 75 | 0.8450 | 56 | 81.9606 | 3565 | 1.7500 | 8 | 0.8500 | 97.9000 | 60 | |
| 5 | 544-1270-38 | 75 | 1.2700 | 38 | 83.5888 | 3565 | 1.7500 | 8 | 0.8500 | 97.9000 | 60 | |
| 6 | 544-1705-28 | 75 | 1.7050 | 28 | 82.6881 | 3565 | 1.7500 | 8 | 0.8500 | 97.9000 | 60 | |
| 7 | 544-925-71 | 100 | 0.9250 | 71 | 113.7520 | 3565 | 1.7500 | 8 | 0.8500 | 97.9000 | 60 | |
| 8 | 544-1330-49 | 100 | 1.3300 | 49 | 112.8780 | 3565 | 1.7500 | 8 | 0.8500 | 97.9000 | 60 | |
| 9 | 544-2130-31 | 100 | 2.1300 | 31 | 114.3670 | 3565 | 1.7500 | 8 | 0.8500 | 97.9000 | 60 | |
| 10 | 544-1245-67 | 125 | 1.2450 | 67 | 144.4790 | 3565 | 1.7500 | 8 | 0.8500 | 97.9000 | 60 | |
| 11 | 544-1415-54 | 125 | 1.4150 | 54 | 132.3460 | 3565 | 1.7500 | 8 | 0.8500 | 97.9000 | 60 | |
| 12 | 544-2150-39 | 125 | 2.1500 | 39 | 145.2320 | 3565 | 1.7500 | 8 | 0.8500 | 97.9000 | 60 | |
| 13 | 544-1280-76 | 150 | 1.2800 | 76 | 168.4940 | 3565 | 1.7500 | 8 | 0.8500 | 97.9000 | 60 | |

Figura D.8: Pestaña Motor
Fuente: Autores

D.3.3. Modelado del motor

El modelado del motor se realiza en la pestaña "Motor" de la herramienta.

El modelado del motor para ser implementado dentro de la simulación del sistema, puede ser realizado cargando los datos de entrada del motor directamente de la base de datos de los motores; la cual se realiza marcando la casilla "Ver base de datos de los motores".

A continuación se busca el motor antes seleccionado en la ventana "selección bomba" u otro que cumpla con el criterio de potencia para su selección. Haciendo clic sobre el motor seleccionado en la tabla "Datos Motores", se procede a hacer clic derecho sobre el mismo motor seleccionado con el fin de cargar sus datos dentro de los recuadros ubicados en panel "Datos de entrada".

En caso que el motor no se encuentre dentro de la base de datos, se rellenan los recuadros que conforman el panel "Datos de Entrada" con los datos obtenidos en la pestaña "Bombeo" sobre el motor, complementado con los datos de placa del motor que son solicitados.

Si se poseen los datos mostrados en la tabla para el motor seleccionado, los mismos puede ser ingresados marcando el botón "ingresando los parámetros del motor", seguido se presiona el botón "determinar parámetros", que abre la ventana "Salvar" donde se puede guardar esta información dentro de la base de datos de los motores⁵.

Una vez se encuentre completa la información dentro del panel "Datos de entrada", se presiona con el mouse en el botón "determinar parámetros", donde abre la ventana C:\WINDOWS\system32\cmd.exe-batc.bat esta ventana se cierra automáticamente y es cuando indica que finalmente se encuentre terminado el modelado.

⁵El ingreso de la información dentro de la bases de datos de los motores y transformadores, será tratado en la sección D.4 más adelante.

Datos de Entrada

| | | | |
|-----------------------|--------------------------|------------------------|-------------------------|
| Resistividad [ohm.m] | Permitividad | Seccion del Conductor | Diametro del Conductor |
| 1.72e-8 | 2.35 | 33.63 | 6.55 |
| Espesor del Conductor | Diametro del Aislamiento | Espesor de la Cubierta | Diametro de la Cubierta |
| 0.1629 | 8.25 | 2.92 | 60 |

Parametros Para ATPDraw

| | Core | Sheath |
|------------|------|--------|
| Rin[m] | 0 | |
| Rout[m] | | |
| Rho[Ohm*m] | | |
| Mu | | |
| Mu(ins) | | |
| Eps(ins) | | |

| | |
|----|--|
| R | |
| L | |
| Xl | |
| C | |
| Xc | |

Radio Total: 0.03

Ejecutar

Datos Cables

| | calibre (AWG) | Diametro conductor | Espesor cobre | Seccion conductor | Diametro Aislamiento | Espesor Aislamiento | Diametro externo | Corriente |
|---|---------------|--------------------|---------------|-------------------|----------------------|---------------------|------------------|-----------|
| 1 | 6 | 4.1200 | 0.1150 | 13.3000 | 5.1900 | 2.9200 | 52 | 75 |
| 2 | 4 | 5.1900 | 0.1292 | 21.1500 | 6.5400 | 2.9200 | 55 | 95 |
| 3 | 3 | 5.8300 | 0.1450 | 26.6700 | 7.3500 | 2.9200 | 57 | 110 |
| 4 | 2 | 6.5500 | 0.1629 | 33.6300 | 8.2500 | 2.9200 | 60 | 130 |
| 5 | 1 | 7.3400 | 0.1829 | 42.4000 | 9.2600 | 2.9200 | 62 | 150 |

Figura D.9: Pestaña Transformador Elevador
Fuente: Autores

D.3.4. Modelado transformador Elevador

De igual forma a la pestaña “Motor”. La pestaña “Transformador Elevador” permite cargar los datos de entrada para el modelado del transformador o su ingreso de forma manual⁶. Ingresados estos valores en el panel “Datos de Entrada”, se da clic en el botón “Determinar”.

⁶El ingreso de la información dentro de la bases de datos de los motores y transformadores, será tratado en la sección D.4 más adelante.

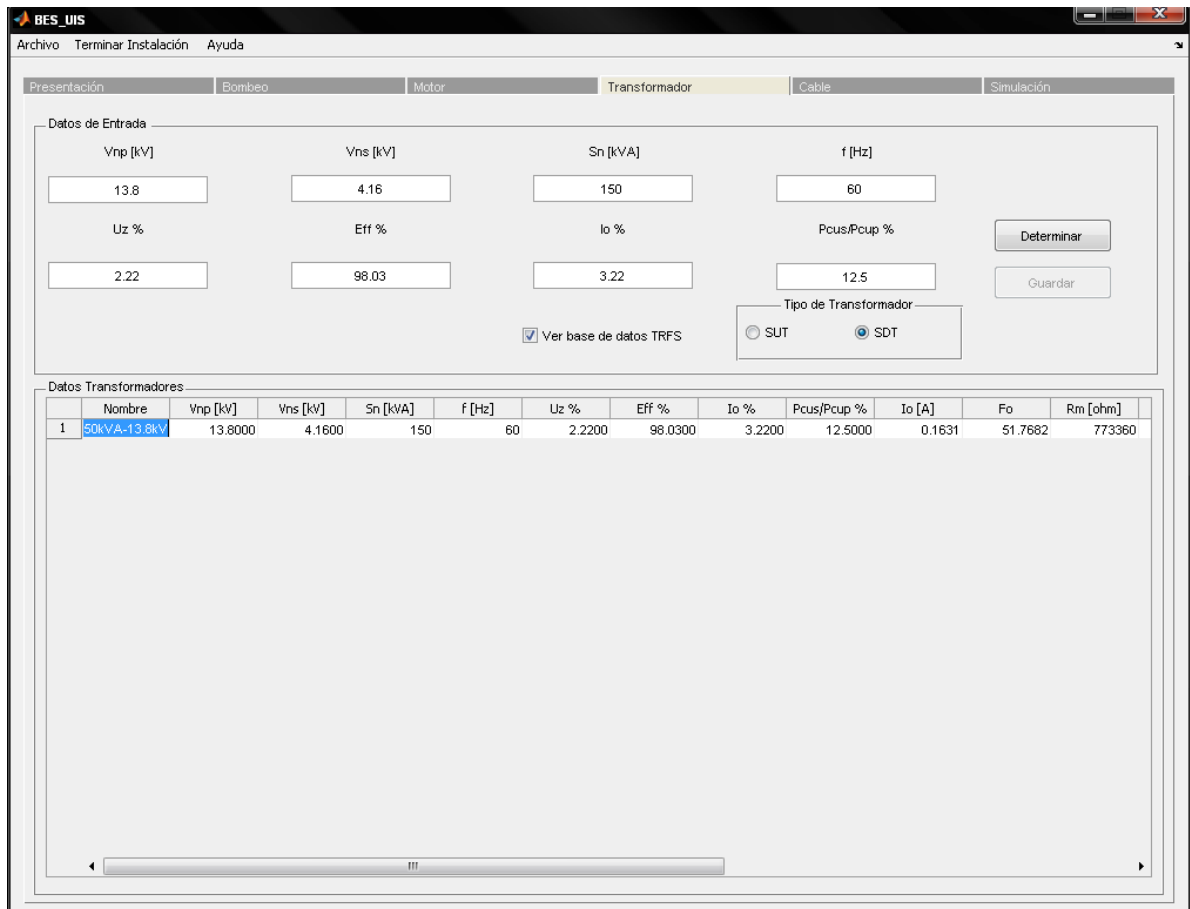


Figura D.10: Pestaña Transformador Reductor
Fuente: Autores

D.3.5. Modelado transformador Reductor

De igual forma que las pestañas anteriores. La pestaña "Transformador Reductor" permite cargar los datos de entrada para el modelado del transformador o su ingreso de forma manual. Ingresados estos valores en el panel "Datos de Entrada", se da clic en el botón "Determinar".

D.3.6. Modelado cable

Esta pestaña presenta una base de datos que contiene los calibres de los conductores más implementados en los sistemas B.E.S. que no puede ser modificada a

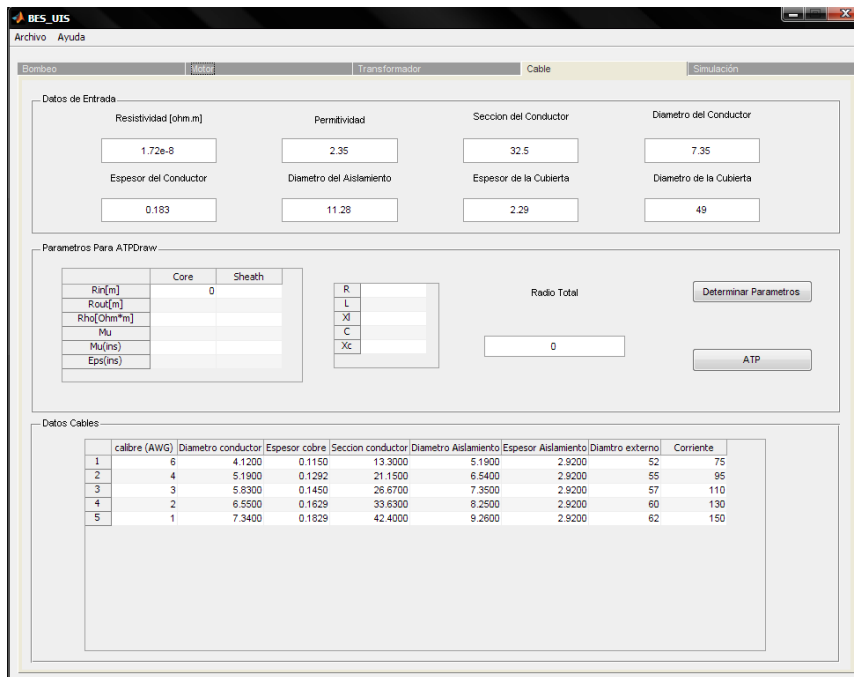


Figura D.11: Pestaña Cable
Fuente: Autores

diferencia de las bases de datos de los motores y transformadores.

Sus datos de entrada pueden ser cargados de forma individual o por la selección de alguno de los conductores dentro de la base de datos.

El botón “Determinar Parámetros” crea los parámetros de entrada para la creación de la librería requerida por el ATP.

D.3.7. Simulación del sistema cable-motor.

Ya modelados el motor, transformadores, cable y cargados en la pestaña “Simulación”. Se procede a seleccionar las salidas deseadas y la configuración del tiempo de cómputo (T_{max}), el delta de tiempo (dt), la frecuencia del Variador ($f_{variador}$) y el deslizamiento del motor⁷. Ya establecidos los requerimientos

⁷ Cuando se desean simular las condiciones de arranque del motor; el deslizamiento debe ser igual a 100 % y cuando se quiera visualizar su funcionamiento en estado estable y condiciones nominales de trabajo se ingresa el respectivo deslizamiento nominal de cada motor.

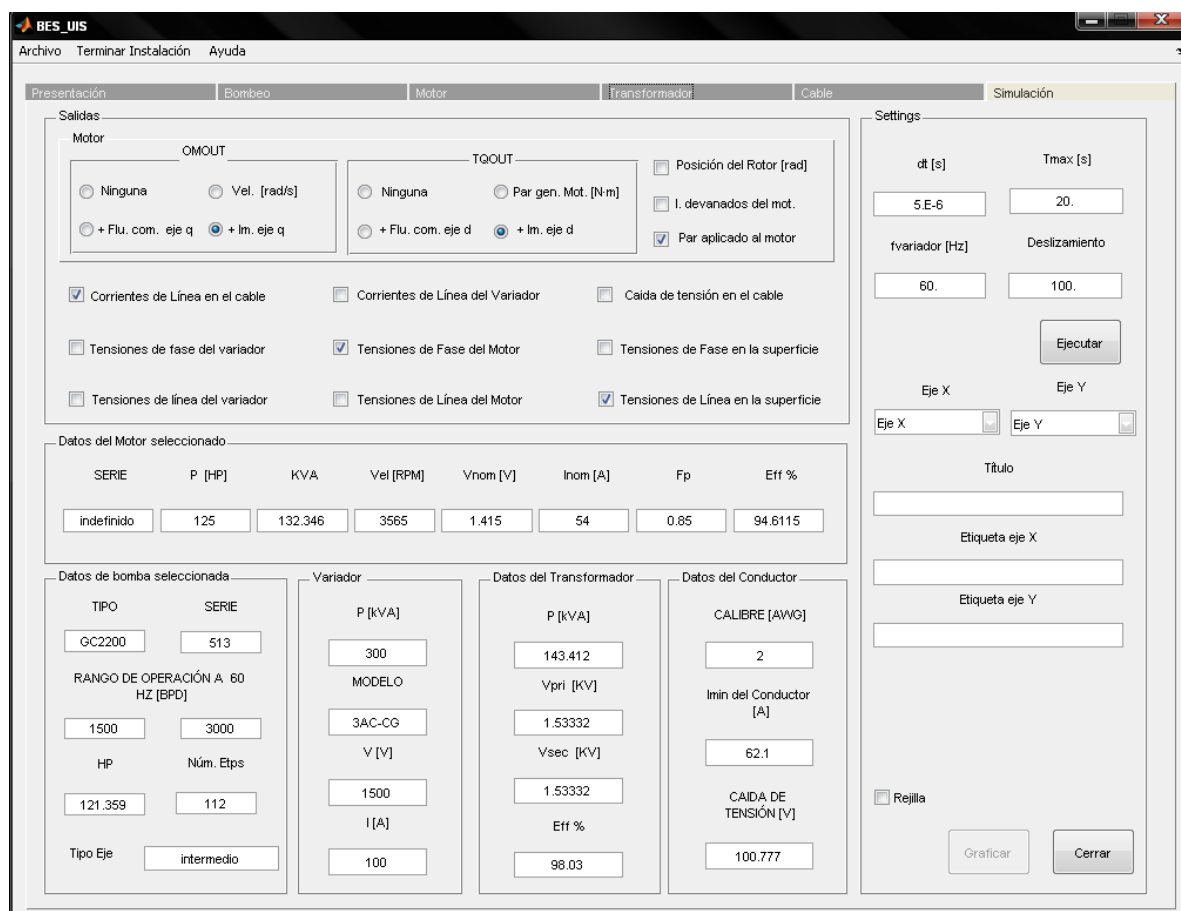


Figura D.12: Pestaña Simulación
Fuente: Autores

anteriores, se procede a ejecutar el proograma presionando el botón “Ejecutar”.

Al finalizar la herramienta software muestra una ventana que indica que la simulación fue finalizada, es necesario que la ventana C:\WINDOWS\system32\cmd.exe-batc.bat se cierre automáticamente antes de cargar los resultados que deseamos visualizar.

En el cuadro de “Salidas” según el marcado de las casillas que se realice se obtendra:⁸

⁸Ver sección D.4

1. Corrientes de línea en el cable: Se obtiene las corriente que circula por el conductor y sirven de alimentación del motor.
2. Corrientes de línea en el variador: Solicita las salidas de las tres corriente de línea que sale del variador.
3. Caída de tensión en el cable: Se obtiene la caída de tensión de las tres fases del conductor que alimenta en motor.
4. Tensiones de fase del variador: Se solicita las tres tensiones de fase a la salida del variador.
5. Tensiones de fase del motor: Se obtienen las tres tensiones de fase en bornes del motor.
6. Tensiones de fase en la superficie: Se solicita las tres tensiones de fase en la superficie.
7. Tensiones de línea del variador: se obtiene las tres tensiones de la línea en bornes del variador.
8. Tensiones de línea del motor: Se obtiene las tres tensiones de la línea en bornes del motor.
9. Tensiones de línea en la superficie: Se obtiene las tres tensiones de la línea en la superficie.
10. OMOUT Ninguna: Impide la salida de la velocidad mecánica del motor, así como el flujo común y la corriente de magnetización de eje q
11. OMOUT Vel [rad/sg]: Se obtiene la salida del Velocidad angular del rotor en [rad/sg].
12. OMOUT +Flu. com. eje q: Se obtiene las salidas de la Velocidad angular del rotor en [rad/sg], y el flujo común al eje q.
13. OMOUT +Im. eje q: Se obtiene las salidas de la Velocidad angular del rotor en [rad/sg], el flujo común al eje, y la Corriente de magnetización del eje q

14. TQOUT Ninguna: Impide la salida de Par generado por el motor en [N·m] , flujo común al eje d, y la corriente de magnetización del eje d.
15. TQOUT Par gen. Mot. [N.m]: Se obtiene la salida del Par generado por el motor en [N·m].
16. TQOUT +Flu. com. eje d: Se obtiene la salida del Par generado por el motor en [N·m], y el flujo común al eje d
17. TQOUT +Im. eje d: Se obtiene la salida del Par generado por el motor en [N·m], el flujo común al eje d, y la corriente de magnetización del eje d.
18. Posición del Rotor [rad]: Se obtiene la salida de posición angular del rotor
19. I. devanados del mot.: Muestra las corriente de los devanados de motor.
20. Par aplicado al motor: Se obtiene el par de carga aplicado al motor en [N·m]

D.3.8. Resultados

Los resultados de la simulación efectuada se realiza escogiendo en los ejes x y y el vector de datos que se desee visualizar, luego se hace clic sobre el botón “Resultados”, el cual abre una ventana de figura de Matlab donde muestra la respuesta que se ha escogido .

D.4. Características

- Permitir la visualización de la base de datos de los motores al dar clic y marcar en el recuadro “ver base de datos de los motores” dentro del Panel “Datos”.
- Permite la selección de los motores contenidos dentro de la base de datos para ser modelado e implementado dentro de la simulación del sistema. Esto se puede hacer haciendo clic izquierdo sobre alguno de los recuadros

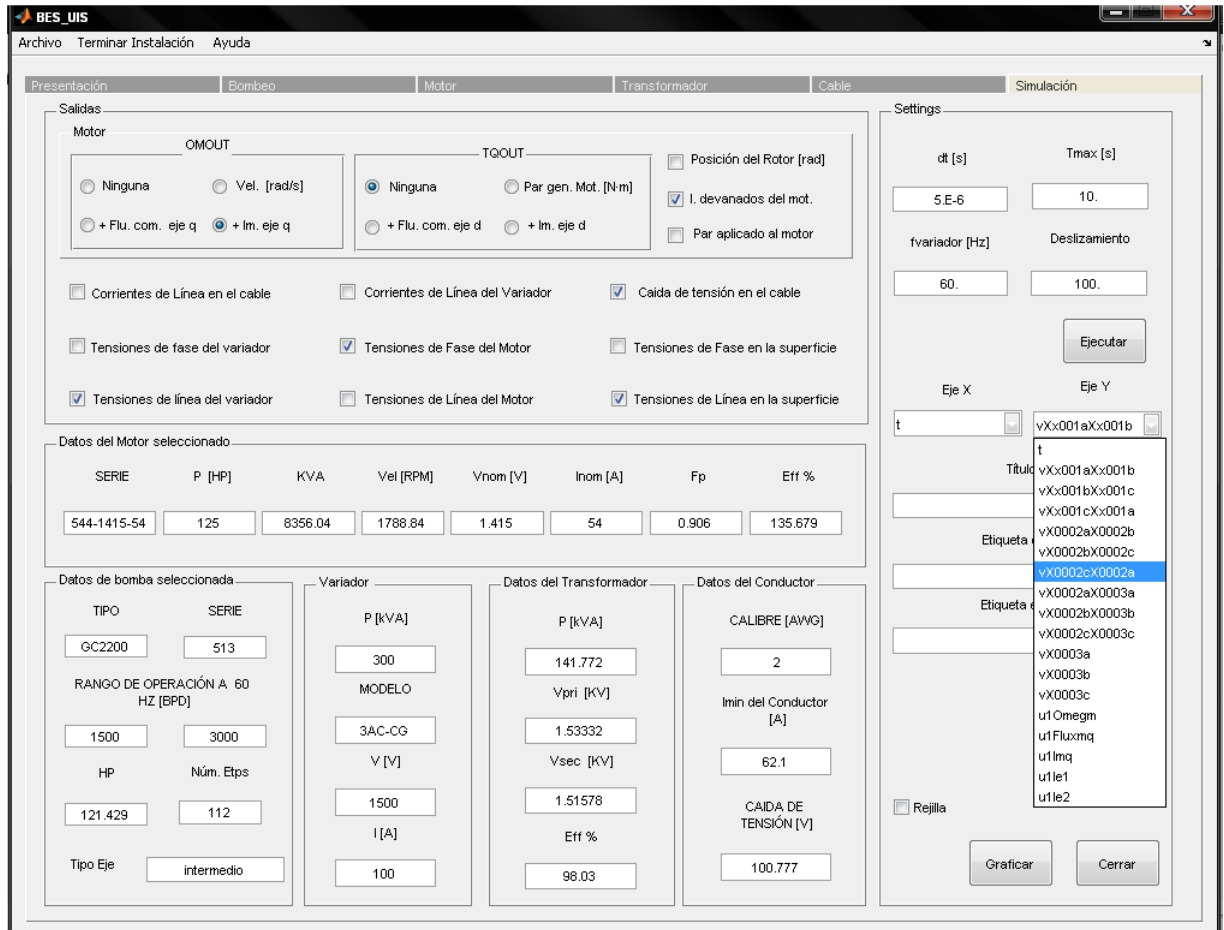


Figura D.13: Ventana de visualización de resultados
Fuente: Autores

de la fila del motor para luego hacer clic derecho sobre alguno de los otros recuadros de la misma fila.

- En caso de ser borrada la base de datos de los motores. La misma puede ser creada en esta pestaña a medida que se van modelando los diversos motores que se desean guardar dentro de la base de datos; dando clic en el botón “guardar” ubicado en el Panel “Datos”.

Nomenclatura resultados

La nomenclatura utilizada por el ATP para nombrar los resultados obtenidos después de la simulación, es algo confusa para el usuario sin experiencia en él. Por esta razón se presenta una serie de pautas a considerar a fin de poder escoger correctamente los resultados a ser determinados.

El ATP implementa en el nombre de sus resultados un máximo de 13 caracteres que brindan la información necesaria sobre el tipo o clase de resultado y el punto o nodo en el cual es tomado. A continuación se presenta un ejemplo de lo anteriormente citado.

- El primer carácter indica generalmente la clase de señal analizada. Es decir si es una respuesta de corriente o tensión, se encontrara generalmente al comienzo de cada una de los resultados una i o una v respectivamente.
- Los siguientes 12 caracteres representan los nombres de los nodos donde fue tomada la respuesta así como de su respectiva fase. Donde los primeros cinco caracteres de estos doce, representan el nombre del primer nodo y su fase está dada por el sexto carácter; mientras que el nombre del otro nodo está dado por los caracteres séptimo al undécimo y su fase está dada por el carácter número doce.

De esta forma; por ejemplo, de querer representar la corriente que pasa a través del cable conductor de la fase A del sistema estudiado se graficaría iX0001aX0002a contra t. Por otra parte si se desea ver la tensión de la fase B en bornes del motor se graficaría vX0003a contra t. Vale notar que para el caso de una tensión de

fase, la cual es medida entre el nodo en cuestión y tierra, el ATP escribe solo el nombre del nodo a estudiar.

A continuación se presenta cada una de las posibles respuestas a las simulaciones hechas por la herramienta.

iX0001aX0002a Corriente que circula la fase A del cable de alimentación del motor en A.

iX0001bX0002b Corriente que circula la fase B del cable de alimentación del motor en A.

iX0001cX0002c Corriente que circula la fase C del cable de alimentación del motor en A.

iXx001aXx002a Corriente que sale la fase A del variador del motor en A.

iXx001bXx002b Corriente que sale la fase B del variador del motor en A.

iXx001cXx002c Corriente que sale la fase C del variador del motor en A.

iXx0031Xx0034 Par de carga aplicado al motor en N·m.

t tiempo en sg.

u1Fluxmd Flujo ligado al eje d.

u1Fluxmq Flujo ligado al eje q.

u1Ie1 Corriente rotorica respecto del eje d.

u1Ie2 Corriente rotorica respecto del eje q.

u1Imd Corriente de magnetización del eje d.

u1Imq Corriente de magnetización del eje q.

u1Omegm Velocidad angular del rotor en rad/sg.

u1Thetam Posición angular del rotor rad.

u1Tqgen Par generado por el motor en N·m

vX0002a Tensión de la fase A del cable en la superficie ó del secundario del transformador en V.

vX0002aX0002b Tensión de línea entre las fases A y B del cable en la superficie ó del secundario del transformador en V.

vX0002aX0003a Caída de tensión del cable en la fase A en V.

vX0002b Tensión de la fase B del cable en la superficie ó del secundario del transformador en V.

vX0002bX0002c Tensión de línea entre las fases B y C del cable en la superficie ó del secundario del transformador en V.

vX0002bX0003b Caída de tensión del cable en la fase B en V.

vX0002c Tensión de la fase C del cable en la superficie ó del secundario del transformador en V.

vX0002cX0002a Tensión de línea entre las fases C y A del cable en la superficie ó del secundario del transformador en V.

vX0002cX0003c Caída de tensión del cable en la fase C en V.

vX0003a Tensión de la fase A en bornes del motor en V.

vX0003aX0003b Tensión de línea en bornes del motor entre las fases A y B en V.

vX0003b Tensión de la fase B en bornes del motor en V.

vX0003bX0003c Tensión de línea en bornes del motor entre las fases B y C en V.

vX0003c Tensión de la fase C en bornes del motor en V.

vX0003cX0003a Tensión de línea en bornes del motor entre las fases C y A en V.

vXx001a Tensión de la fase A en bornes del variador en V.

vXx001aXx001b Tensión de línea en bornes del variador entre las fases A y B en V.

vXx001b Tensión de la fase B en bornes del variador en V.

vXx001bXx001c Tensión de línea en bornes del variador entre las fases B y C en V.

vXx001c Tensión de la fase C en bornes del variador en V.

vXx001cXx001a Tensión de línea en bornes del variador entre las fases C y A en V.

Nomenclatura bases de datos

- Motores.

Los nombres dados a los motores dentro de su base de datos están formados por el número de serie de estos, seguido de sus respectivos valores nominales de tensión y corriente.

- Transformadores.

Para los transformadores, los nombres dados dentro de su base de datos están formados por sus respectivos valores de potencia aparente y tensión.

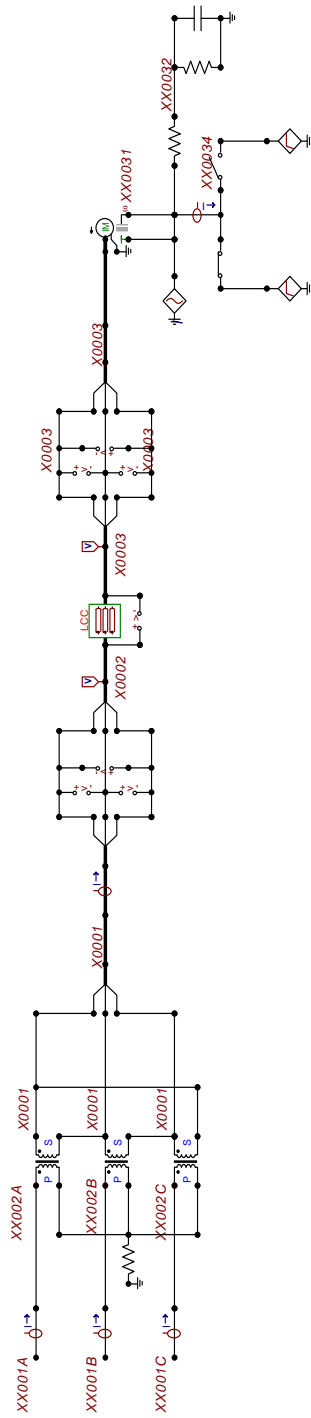


Figura D.14: Sistema eléctrico representado en ATPDraw
Fuente: Autores