

PROGRAMA COMPUTARIZADO PARA EL DISEÑO DE SISTEMAS DE
LEVANTAMIENTO ARTIFICIAL POR BOMBEO ELECTROSUMERGIBLE

JUAN PABLO NARANJO HERNÁNDEZ
BRAULIO JESÚS VANEGAS HERNÁNDEZ

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERIAS FÍSICO-QUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA DE PETRÓLEOS
BUCARAMANGA

2016

PROGRAMA COMPUTARIZADO PARA EL DISEÑO DE SISTEMAS DE
LEVANTAMIENTO ARTIFICIAL POR BOMBEO ELECTROSUMERGIBLE

JUAN PABLO NARANJO HERNÁNDEZ
BRAULIO JESÚS VANEGAS HERNÁNDEZ

Trabajo de Grado para optar al título de
Ingeniero de Petróleos

Director
ERIK GIOVANY MONTES PÁEZ
Magister en Ingeniería de Hidrocarburos

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERIAS FÍSICO-QUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA DE PETRÓLEOS
BUCARAMANGA

2016

DEDICATORIA

A Dios por ser el motor que le da energía a mi vida y fortaleza en esos momentos difíciles.

A mi mamá, mi hermana y toda mi familia por estar siempre a mi lado y enseñarme la virtud de la resiliencia.

A William Sierra y Lorena Ramírez por ese apoyo incondicional en este gran proyecto que emprendí hace cinco años.

Braulio Vanegas

DEDICATORIA

A mis padres, hermanos y toda mi familia por su apoyo incondicional en ésta etapa de mi vida.

Juan Pablo Naranjo

TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
	21
1.	22
1.1	22
1.2	23
1.3	24
1.4	25
1.5	27
1.6	30
1.6.1	31
1.6.2	32
1.7	33
2.	39
2.1	39
2.2	40
2.3	41
2.4	41
2.5	42
2.5.1	43
2.5.1.1	43
2.5.1.2	43
2.5.1.3	44
2.5.1.4	45
2.5.1.5	45
2.5.1.6	45
2.5.2	46
2.5.2.1	46
2.5.2.2	47
2.5.2.3	49
2.5.2.4	50
2.5.2.5	51

2.5.2.6	Cable de potencia	54
2.5.3	Accesorios	55
2.5.3.1	Válvula de retención	55
2.5.3.2	Válvula de drenaje	55
2.5.3.3	Flejes	55
2.5.3.4	Acoplamientos	56
2.5.3.5	Centralizador	56
3.	DESARROLLO DEL SISTEMA EXPERTO EN DISEÑO BES	57
3.1	REVISIÓN CONCEPTUAL DEL DISEÑO	58
3.2	ANÁLISIS CUALITATIVO Y CUANTITATIVO PARA EL SE	60
3.3	DISEÑO DEL BOMBEO ELECTROSUMERGIBLE EN EL SE	61
3.3.1	Información básica requerida	63
3.3.2	Capacidad de Producción	63
3.3.3	Cálculos preliminares	68
3.3.4	Condiciones de asentamiento de la bomba	69
3.3.4.1	Acompañamiento del SE en la decisión sobre los parámetros a utilizar	75
3.3.5	Cálculos estáticos para el gas	80
3.3.5.1	Acompañamiento del SE en la decisión sobre los cálculos del gas y la elección del separador	81
3.3.6	Selección de la bomba	85
3.3.6.1	Acompañamiento del SE en la decisión sobre la elección de la bomba	87
3.3.7	Selección motor y sello	92
3.3.7.1	Acompañamiento del SE en la decisión sobre la elección del motor	95
3.3.8	Selección del cable eléctrico	95
3.3.9	Cálculos adicionales	97
3.3.10	Accesorios y equipos opcionales	99
3.3.11	Sistema BES de Velocidad Variable	99
3.4	DIAGRAMA DE FLUJO DE NAVA	100
3.5	SEGUIMIENTO	107
4.	EVALUACIÓN DEL SISTEMA EXPERTO CON EL BES	108
4.1	POZO CIRA 2114	108
4.2	POZO Parahuacu 10	113
4.3	ANÁLISIS DE RESULTADOS	118
4.3.1	Pozo Cira 2114	118

4.3.2	Pozo Cira Parahuacu 10	121
5.	CONCLUSIONES	124
6.	RECOMENDACIONES	125
	BIBLIOGRAFÍA	127
	ANEXOS	131

LISTA DE FIGURAS

		Pág.
Figura 1	Sistema de bombeo electrosumergible	42
Figura 2	Transformador SDT	43
Figura 3	Transformador SUT	43
Figura 4	Variador de frecuencia	44
Figura 5	Cabezal de pozo	46
Figura 6	Sensor de fondo	47
Figura 7	Partes del motor	48
Figura 8	Sección sellante	50
Figura 9	Separador de gas	51
Figura 10	Bomba centrífuga	52
Figura 11	Impulsor y difusor	53
Figura 12	Una etapa de la bomba electrosumergible	54
Figura 13	Válvula de retención	55
Figura 14	Acoplamientos	56
Figura 15	Curva de IPR (índice de productividad constante)	65
Figura 16	Curva IPR, método de Vogel	67
Figura 17	Curva IPR, método del IPR compuesto	68
Figura 18	Eficiencia separación de gas con tasa de flujo menor a 7000 blsd	84
Figura 19	Eficiencia separación de gas con tasa de flujo mayor a 7000 blsd	84
Figura 20	Curva característica de desempeño de una bomba centrífuga.	86
Figura 21	TDH del sistema para diferentes caudales de flujo.	89
Figura 22	Caída de voltaje para diferentes tamaños de cable.	96
Figura 23	Portada NAVA Pozo Cira 2114	108
Figura 24	Entrada de datos Pozo Cira 2114	109
Figura 25	Curva IPR Pozo Cira 2114	109
Figura 26	Asentamiento de Bomba Pozo Cira 2114	110
Figura 27	Caudal crítico Arenamiento Pozo Cira 2114	110
Figura 28	Caudal crítico Conificación Pozo Cira 2114	111

Figura 29	Selección de Bomba Pozo Cira 2114	111
Figura 30	Selección de Motor-Sello-Separador Pozo Cira 2114	112
Figura 31	Selección de Cable Pozo Cira 2114	112
Figura 32	Diseño Final Pozo Cira 2114	113
Figura 33	Portada NAVA Pozo Parahuacu 10	114
Figura 34	Entrada de Datos Pozo Parahuacu 10	114
Figura 35	Curva IPR Pozo Parahuacu 10	115
Figura 36	Asentamiento de Bomba Pozo Parahuacu 10	115
Figura 37	Selección de Bomba Pozo Parahuacu 10	116
Figura 38	Selección de Motor-Sello-Separador Pozo Parahuacu 10	116
Figura 39	Selección de Cable Pozo Parahuacu 10	117
Figura 40	Diseño Final Pozo Parahuacu 10	117
Figura 41	Página principal NAVA.	132
Figura 42	Entrada de datos – NAVA	133
Figura 43	Curva IPR – NAVA	134
Figura 44	Arenamiento – NAVA	135
Figura 45	Conificación – NAVA	135
Figura 46	Asentamiento bomba – NAVA	136
Figura 47	Selección bomba – NAVA	137
Figura 48	Curva oferta y demanda del pozo – NAVA	137
Figura 49	Emulsión – NAVA	137
Figura 50	Selección del motor – NAVA	138
Figura 51	Selección del cable – NAVA	138
Figura 52	BES final – NAVA	139
Figura 53	Ayuda – NAVA	140
Figura 54	Interfaz Seguimiento – NAVA	141
Figura 55	Interfaz nuevo pozo – NAVA	142
Figura 56	Interfaz ingreso de datos nuevo pozo – NAVA	143
Figura 57	Interfaz editar pozo – NAVA	145
Figura 58	Interfaz selección gráficas – NAVA	146
Figura 59	Interfaz gráficas – NAVA	147

LISTA DE TABLAS

		Pág.
Tabla 1	Screening de aplicación	40
Tabla 2	Tamaños y capacidades de producción Bombas	51
Tabla 3	Datos básicos diseño de un SLA por bombeo electrosumergible	62
Tabla 4	Comparación NAVA y AutographPC	118
Tabla 5	Comparación NAVA y SubPump	121

LISTA DE ANEXOS

	Pág.
Anexo A Programa computarizado NAVA	131

GLOSARIO

- α : Constante de Biot
- API: Gravedad API del crudo
- BHP₁: Potencia de la bomba @ 60 Hz, [kw]
- BHP₂: Potencia de la bomba @ otra frecuencia, [kw]
- BHP₂': Potencia de la bomba @ otra frecuencia corregida por viscosidad, [kw]
- BHP_{motor}: Potencia del motor, [kw]
- B_g: Factor volumétrico de formación del gas, [ft³/scf]
- B_o: Factor volumétrico de formación del crudo, [bls/stb]
- BSW: Contenido de agua, [fracción]
- C: Constante de Hazen - Williams
- ΔP : Diferencial de presión, [psi]
- ∇P_{ov} : Gradiente de presión de sobrecarga, [psi/ft]
- ∇P_p : Gradiente de presión de poro, [psi/ft]
- D: Profundidad, [ft]
- E: Eficiencia, [fracción]
- F_{cT}: Factor de corrección por temperatura para el cable
- FOP: Sumergencia de la bomba, [ft]
- F_r: Factor de pérdidas por fricción en tubería, [ft/1000ft]
- F_{rr}: Gradiente presión, [psi/ft]
- g: Gravedad, [ft/seg²]
- GOR: Relación gas-aceite a condiciones estándar, [scf/stb]
- H_{aP}: Altura por encima de las perforaciones, [ft]
- H_{bP}: Altura por debajo de las perforaciones, [ft]
- H_G: Espesor inicial de la zona de gas, [ft]
- H_o: Espesor inicial de la zona de aceite, [ft]

- HP: Caballos de fuerza del motor, [Hp]
- H_P : Espesor cañoneado de la zona de interés, [ft]
- HP_{sello} : Potencia del sello @ 60 Hz, [kw]
- $HP_{\text{sep. gas}}$: Potencia del separador de gas @ frecuencia de diseño, [kw]
- H_W : Espesor inicial de la zona de agua, [ft]
- ID_{csg} : Diámetro interno del casing, [in]
- IP: Índice de productividad, [blsd/psi]
- KW: Potencia del sistema, [kw]
- L_i : Cohesión, [psi]
- μ_f : Viscosidad del fluido, [cp]
- μ : Viscosidad, [cp]
- μ'_{abs} : Viscosidad Absoluta corregida por gas en solución, [cp]
- μ_{abs} : Viscosidad Absoluta sin gas, [cp]
- (MCP)MC: Máxima caída de presión permisible Mohr Coulomb, [psi]
- (MCP)MC: Máxima caída de presión permisible Griffith, [psi]
- n: Número de moles del gas
- n_{bomba} : Eficiencia de la bomba
- n_{fl} : Gradiente dinámico fluido [psi/ft]
- n_{g} : Gradiente dinámico gas [psi/ft]
- n_{motor} : Eficiencia del motor
- n_o : Gradiente dinámico oil [psi/ft]
- σ : Tensión superficial, [lb/seg²]
- Φ : Porosidad, [fracción]
- OD_{tbg} : Diámetro externo del tubing, [in]
- ρ_g : Densidad del gas, [lb/ft³]
- ρ_L : Densidad del líquido, [lb/ft³]
- P_r : Presión del yacimiento, [psi]

- P_b : Presión de burbuja, [psi]
- P_{csg} : Presión del casing, [psi]
- PIP: Presión de entrada a la bomba, [psi]
- P_{sc} : Presión a condiciones estándar, [psi]
- P_{wf} : Presión de fondo fluyente, [psi]
- P_{wfd} : Presión de fondo fluyente @ Q_t deseado, [psi]
- q : Caudal, [bls]
- q_f : Caudal fluido, [bls]
- Q_2 : Caudal total corregido por gravedad específica y frecuencia, [bls]
- Q_2' : Caudal total corregido por viscosidad, [bls]
- Q_b : Caudal en el punto de burbuja, [blsd]
- Q_g : Caudal de gas en yacimiento, [bls]
- Q_g' : Caudal de gas en superficie, [stb]
- Q_N : Caudal total, [bls]
- Q_o : Caudal de aceite en yacimiento, [bls]
- Q_o' : Caudal de aceite en superficie, [stb]
- Q_{oc} : Tasa crítica por conificación, [bls]
- $Q_{omáx.}$: Caudal de aceite máximo, [blsd]
- Q_t : Caudal de agua + aceite en yacimiento, [bls]
- Q_t' : Caudal de agua + aceite en superficie, [stb]
- Q_w : Caudal de agua en yacimiento, [bls]
- Q_w' : Caudal de agua en superficie, [stb]
- r_e : Radio de drenaje para un pozo vertical, [ft]
- r_w : Radio del pozo, [ft]
- R : Constante de equilibrio del gas
- R_s : Relación gas-aceite en solución, [scf/stb]
- RPM_1 : Revoluciones por minuto @ 60 Hz, [rpm]

- RPM_2 : Revoluciones por minuto @ otra frecuencia, [rpm]
- SSU: Viscosidad Saybolt, [seg]
- SSU': Viscosidad Saybolt corregida según tipo de emulsión, [seg]
- T: Temperatura, [°R]
- TDH₁: Altura Dinámica Total @ 60 Hz, [ft]
- TDH₂: Altura Dinámica Total @ otra frecuencia, [ft]
- TDH₂': Altura Dinámica Total @ otra frecuencia corregida por viscosidad, [ft]
- T_{sc}: Temperatura a condiciones estándar, [°R]
- TVD_p: Profundidad de la bomba, [ft]
- TVD_{perf. tope}: Profundidad del tope de los perforados, [ft]
- V_c: Viscosidad cinemática, [cstk]
- V_∞: Velocidad de elevación final de burbujeo, [ft/seg]
- V_f: Volumen de fluido, [ft³]
- V_{motor}: Voltaje requerido por el motor, [voltios]
- V_{placa motor}: Voltaje de la placa del motor, [voltios]
- V_{SL}: Velocidad superficial, [ft/seg]
- V_{start up}: Voltaje mínimo de arranque del motor, [voltios]
- V_{superficie}: Voltaje requerido en superficie, [voltios]
- V_t: Volumen total, [ft³]
- X_g: Fracción de gas
- X_o: Fracción de aceite
- X_w: Fracción de agua
- $\gamma_{fl\ bombear}$: Gravedad específica del fluido a bombear
- γ_{fl} : Gravedad específica del fluido
- γ_g : Gravedad específica del gas
- γ_o : Gravedad específica del crudo
- Z: Factor de compresibilidad del gas

RESUMEN

TÍTULO: PROGRAMA COMPUTARIZADO PARA EL DISEÑO DE SISTEMAS DE LEVANTAMIENTO ARTIFICIAL POR BOMBEO ELECTROSUMERGIBLE*

AUTORES: Juan Pablo Naranjo Hernández, Braulio Jesús Vanegas Hernández**

PALABRAS CLAVE: PROGRAMA COMPUTARIZADO, DISEÑO, LEVANTAMIENTO ARTIFICIAL, BOMBEO ELECTROSUMERGIBLE

DESCRIPCIÓN:

NAVA cuenta con dos interfaces principales. En la primera interfaz, se buscó establecer un algoritmo más eficiente que los convencionales, esto mediante la revisión de los conceptos de diseño propuestos por diferentes fuentes; además, este se presenta mediante una metodología de diseño que orienta al usuario en la toma de decisiones, por medio de un sistema experto.

La segunda, es una interfaz de seguimiento de pozos, la cual le permita al usuario, a partir de datos de producción, asegurarse que el sistema BES se ejecute en la ventana óptima de operación.

El desarrollo y aplicación de NAVA se describe a partir de seis capítulos.

El **capítulo 1** introduce el concepto de sistema experto, los tipos de sistema expertos existentes, la estructura que tienen y las tareas que realizan.

El **capítulo 2** establece los principios de funcionamiento y equipos básicos necesarios para un buen funcionamiento del sistema BES.

El **capítulo 3** evidencia el desarrollo tanto del algoritmo efectuado en la interfaz de diseño y seguimiento, como del sistema experto implementado en NAVA. Se compara las diferentes metodologías existentes para el diseño, y se establece una más completa; por otro lado, se explica el tipo de sistema experto utilizado y sus funciones dentro del proceso de diseño BES.

El **capítulo 4** analiza los resultados de NAVA con respecto al diseño efectuado por softwares comerciales en los pozos Cira 2114 (Autograph PC) y Parahuacu 10 (SubPump).

Los **capítulos 5 y 6** presentan tanto algunas recomendaciones para la implementación de NAVA, como las conclusiones del proyecto.

* Trabajo de grado

** Facultad de Ingenierías Físico-Químicas. Escuela de ingeniería de Petróleos.
Director: M.Sc. Erik Giovany Montes Páez

ABSTRACT

TITLE: SOFTWARE TOOL FOR DESIGN OF ELECTRIC SUBMERSIBLE PUMPS' SYSTEMS*

AUTHORS: Juan Pablo Naranjo Hernández, Braulio Jesús Vanegas Hernández**

KEYWORDS: SOFTWARE, DESIGN, ARTIFICIAL LIFT SYSTEMS, ELECTRIC SUBMERSIBLE PUMPS' SYSTEMS

DESCRIPTION:

NAVA has two main interfaces. The first one, it was established a more-efficient algorithm than conventional, this as a product by going over the design concepts proposed by different sources; in addition, NAVA shows a design methodology that guides the user in decision-making through an expert system.

The second one, it is a well monitoring interface, which allows the user, since production data is available, to ensure the BES system to run at the optimum operating window.

Both NAVA' development and application are described through 6 chapters.

Chapter 1 introduces expert system's concept, the existing kind of expert systems, their structure, and also how they work.

Chapter 2 establishes the operating principles and basic equipment which are need for BES' good performance.

Chapter 3 shows both the design algorithm making process and the implementation of the expert system in NAVA. It is compared several BES design methodologies and it is given as a result a more-efficient one; on the other hand, it is explained both the kind of expert system used and its performance in the BES design process.

Chapter 4 analyzes NAVA results regarding other software which were used in Cira 2114 (Autograph PC) and Parahuacu 10 (SubPump) BES design.

Chapter 5 - 6 give some pieces of advice about the right implementation of NAVA, but also shows the final findings.

* Degree Project

** Department of Physico - Chemical Engineering. Petroleum Engineering School
Tutor: M.Sc. Erick Giovany Montes Páez.

INTRODUCCIÓN

Dada la situación que se presenta en la mayoría de los pozos petroleros a nivel mundial, en la cual la formación es incapaz de producir por si misma o simplemente no se tiene la tasa deseada, se hace necesaria la intervención por parte de la ingeniería en el proceso. Cerca de un 70 % de los pozos petroleros utilizan un SLA como primer modelo de desarrollo para este tipo de pozos¹.

En el presente proyecto se pretende hacer énfasis en el SLA por bombeo electrosumergible, gracias al cual se producen 1 de cada 12 barriles de petróleo en el mundo. Para abordar su estudio, se analiza en primera instancia los principios y equipos básicos de funcionamiento, posteriormente se plantea la viabilidad de realizar un software que realice el diseño BES.

Se es consciente que programas comerciales ya existen con este propósito, por lo que se propone mejorar el algoritmo de diseño e implementar igualmente un sistema experto que brinde acompañamiento en la toma de decisiones, tal que el software resultado sea meramente académico. En los siguientes capítulos se emprenderá el desarrollo de este objetivo. Se analiza en primera instancia el concepto de sistema experto, tipos, principio de funcionamiento, estructura, entre otras cosas. Todo esto para definir el tipo de sistema a experto a emplear.

Posteriormente se estudia las diferentes metodologías existentes para el diseño BES, de tal manera que un algoritmo más eficiente es desarrollado. Entre estas metodologías se destaca la metodología Baker, Schlumberger y Daniel Bustamante. El programa final es probado mediante la comparación con programas comerciales empleados en los pozos Cira 2114 y Parahuacu 10.

¹ AGUILAR APOLO, Lenin José. Estudio de confiabilidad en los equipos de bombeo electrosumergible, mediante análisis de fallas en los bloques 14 y 17. Trabajo de grado presentado para optar por el título de ingeniero de Petróleos, Quito, 2014.

1. REVISIÓN SISTEMÁTICA DE UN SISTEMA EXPERTO

Se sabe que una de las características de los seres vivos es la inteligencia, que todos tienen una capacidad o grado distinto de inteligencia, que depende de factores biológicos, psicológicos y desarrollo mental; a continuación, se revisarán algunos conceptos generales sobre inteligencia:

- Inteligencia: Es la aptitud de crear relaciones; esta creación, puede darse de manera sensorial, como en la inteligencia animal; también puede darse de manera intelectual, como es el caso del ser humano, que pone en juego el lenguaje y los conceptos.
- Inteligencia: Es posible conceptualizarla como la habilidad para adquirir, comprender y aplicar conocimiento; o como la aptitud para recordar, pensar y razonar.
- Inteligencia: Podemos también decir que es la capacidad para solucionar problemas lo cual requiere de conocimiento y relaciones.

Como se puede observar, los conceptos de inteligencia son relativos y variables, pero en general están relacionados a la capacidad de crear relaciones y generar conocimiento para aplicarlos en la solución de problemas; está demostrado que inteligencia y conocimiento son conceptos íntimamente ligados².

1.1 INTELIGENCIA ARTIFICIAL

La Inteligencia Artificial es el estudio de cómo hacer que las computadoras hagan cosas que, en estos momentos, hace mejor el hombre. Para otros, la Inteligencia

² SÁNCHEZ ROMERO, Filiberto. Diseño de un sistema experto para la aplicación del bombeo mecánico intermitente en pozos productores de aceite, Trabajo de grado presentado para optar por el título de Maestro en Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, México, 2014.

Artificial (IA) es una ciencia que intenta la creación de programas para máquinas que imiten el comportamiento y la comprensión humana, que sea capaz de aprender, reconocer y pensar.

La inteligencia artificial está orientada a conseguir que las máquinas realicen trabajos donde se aplique la inteligencia, el razonamiento y el conocimiento de un ser humano.

1.2 DEFINICIÓN DE UN SISTEMA EXPERTO ³

Se puede decir que los Sistemas Expertos son el primer resultado operacional de la Inteligencia artificial, pues logran resolver problemas a través del conocimiento y raciocinio de igual forma que lo hace el experto humano. Un Sistema Experto (SE), es básicamente un programa de computadora basado en conocimientos y raciocinio que lleva a cabo tareas que generalmente sólo realiza un experto humano; es decir, es un programa que imita el comportamiento humano en el sentido de que utiliza la información que le es proporcionada para poder dar una opinión sobre un tema en especial.

Otros autores lo definen como sigue: un Sistema Experto es un programa de computadora interactivo que contiene la experiencia, conocimiento y habilidad propios de una persona o grupos de personas especialistas en un área particular del conocimiento humano, de manera que permitan resolver problemas específicos de ése área de manera inteligente y satisfactoria. La tarea principal de un SE es tratar de aconsejar al usuario.

Los usuarios que introducen la información al SE son en realidad los expertos humanos, y tratan a su vez de estructurar los conocimientos que poseen para

³ CAMACHO JUAREZ, Fabián Alejandro. CERVANTES BIRUETE, Rafael. Desarrollo de un sistema experto para diseño y optimización operativa del bombeo mecánico. Trabajo de grado presentado para optar por el título de Ingeniero Petrolero, UNAM, México, 2013.

ponerlos entonces a disposición del sistema. Un problema se presta a ser resuelto usando un Sistema Experto cuando:

- Una solución del problema tiene una rentabilidad tan alta que justifica el desarrollo de un sistema, pues las soluciones son necesidades del área y no se ha trabajado en otros métodos para obtenerla.
- El problema puede resolverse sólo por un conocimiento experto que puede dar forma a los conocimientos necesarios para resolver el problema, y la intervención de experto dará al sistema la experiencia que necesita.
- El problema puede resolverse solamente por un conocimiento experto en vez de usar algoritmos particulares.
- Se tiene acceso a un experto que puede dar forma a los conocimientos necesarios para resolver el problema. La intervención de este experto dará al sistema la experiencia que necesita.
- El problema puede o no tener una solución única. Los Sistemas Expertos funcionan mejor con problemas que tienen un cierto número de soluciones aceptables.
- El problema cambia rápidamente, o bien el conocimiento es el que cambia rápidamente, o sus soluciones son las que cambian constantemente.
- El desarrollo de un Sistema Experto no se considera que está acabado una vez que funciona este, sino que continúan desarrollando y actualizando tanto el conocimiento del sistema como los métodos de procesamiento, quedando reflejados los progresos o modificaciones en el campo, área o sistema.

1.3 LOS EXPERTOS HUMANOS ⁴

Un experto humano es una persona que es competente en un área determinada del conocimiento o del saber. Un experto humano es alguien que tiene un amplio

⁴ SÁNCHEZ ROMERO. Op. Cit., p. 20.

conocimiento sobre un tema determinado y que puede dar un consejo adecuado; esta experiencia solo se adquiere tras un largo aprendizaje y a base de mucha experiencia. Los expertos humanos tienen las siguientes características generales:

- Son personas que son escasas en número, en algunos casos su comportamiento es poco “ortodoxo” e “incomprensible” frente a los problemas que se les enfrentan.
- Son caros por dos motivos: por su escaso número y por necesitar un largo periodo de aprendizaje.
- No están siempre disponibles, pues son humanos y cuando se jubilan o mueren se llevan con ellos todos sus conocimientos. Es por eso que tradicionalmente están acompañados de un “aprendiz”.
- Hay expertos informales o poco comunicativos, lo que a veces les hace antipáticos.

1.4 TIPOS DE SISTEMAS EXPERTOS ⁵

Hay muchos puntos de vista desde los cuales se pueden clasificar los Sistemas Expertos. Algunos de ellos son:

- **Por la forma de almacenar conocimiento**

Se pueden distinguir sistemas basados en reglas y sistemas basados en probabilidad. Así en el primer caso, el conocimiento se almacena en forma de hechos y reglas, mientras que el segundo, la base de conocimientos está constituida por hechos y sus dependencias probabilísticas; en el primer caso el motor de inferencia opera mediante encadenamiento de reglas hacia atrás y adelante,

⁵ CAMACHO JUAREZ, CERVANTES BIRUETE. Op. cit., p. 21.

mientras que el segundo caso opera mediante la evaluación de probabilidades condicionales. Finalmente, también hay diferencias en la adquisición del conocimiento y el método de explicación.

- **Por la naturaleza de la tarea a realizar: así se tiene cuatro posibilidades**

- Diagnóstico o Clasificación: se conocen soluciones y se tratan de clasificarlas o diagnosticarlas en función de una serie de datos. Por ejemplo: sistema de diagnóstico médico.
- Monitorización: análisis del comportamiento de un sistema buscando posibles fallos, en este caso es importante contemplar la evolución del sistema pues no siempre los mismos datos dan lugar a idénticas soluciones.
- Diseño: se busca la construcción de la solución a un problema, que en principio es desconocida, a partir de datos y restricciones a satisfacer.
- Predicción: se estudia el comportamiento de un sistema.

- **Por la interacción del usuario**

- Apoyo: el sistema aconseja al usuario, que mantiene la capacidad de una última decisión. Por ejemplo, el diagnóstico médico.
- Control: el sistema actúa directamente sin intervención humana.
- Crítica: Su misión es analizar y criticar decisiones tomadas por el usuario.

- **Por la limitación de tiempo para tomar decisiones**

- Tiempo ilimitado: por ejemplo, aquellos que emplean conocimiento casual, que busca orígenes de un problema que ha ocurrido y cuyo análisis no necesita ser inmediato.
- Tiempo limitado (tiempo real): sistemas que necesitan actuar controlando o monitorizando dispositivos y que han de tomar decisiones inmediatas frente a los problemas que surjan. Por ejemplo, el control de una red de comunicaciones.

- **Por la variabilidad temporal del conocimiento**
 - Estáticos: la base del conocimiento no se altera durante el proceso de decisión.
 - Dinámicos: ocurren cambios en la base de conocimiento durante la toma de decisiones. Estos cambios pueden ser predecibles o impredecibles y además pueden, bien añadir información, bien modificar la información ya existente.

- **Por la naturaleza del conocimiento almacenado**
 - Basado en experiencia: el conocimiento se basa en experiencias o hechos ocasionados conocidos por el experto, pero sin que existe una causa clara para los efectos que se observan.
 - Basado en relaciones causa-efecto.

- **Por la certeza de la información**
 - Completa o perfecta: se conocen todos los datos y reglas necesarios para la decisión.
 - Imperfecta: que puede ser incompleta (falta información para tomar decisiones), Datos inciertos (o no confirmados), Conocimientos incierto (reglas no siempre validas), Terminología ambigua (dobles sentidos, etc.).

1.5 ESTRUCTURA DE UN SISTEMA EXPERTO ⁶

Un Sistema Experto como tal debe estar bien estructurado ya que su trabajo es muy difícil, a continuación, se muestran las partes principales de un sistema experto según (Rojas, L. & Leiva, A. 2000).

⁶ SÁNCHEZ ROMERO. Op. Cit., p. 20,22.

○ **Base de Conocimiento**

Aquí se encuentran los conocimientos del experto humano, en forma ordenada y estructurada, el tipo de conocimiento es permanente en el sistema. Pueden existir tres tipos de conocimiento, el primero de ellos son las reglas, aquellas que se forman a partir de oraciones condicionales como un simple “if” “else” que existe en programación o un “si” “no” que existe en los arboles de decisión; otro tipo de conocimiento son las afirmaciones y respuestas, que son aquellas estructuras que engloban conocimiento predecible, el ultimo tipo de conocimiento son los hechos, estos son sucesos lógicos y cotidianos que pasan en la vida real.

○ **Motor de Interferencia**

Es la unidad lógica con la que se extraen conclusiones de la base de conocimiento procesando el conocimiento, es como el corazón del sistema experto, trabaja de la siguiente manera, teniendo la base de conocimiento completa es necesario ser ejecutada por un mecanismo de razonamiento y un control de búsqueda para resolver problemas.

Éste mecanismo es la unidad lógica con la que se extraen conclusiones de la base de conocimientos entonces el motor de inferencia toma los hechos y los conocimientos para obtener nuevas conclusiones o hechos. Las principales funciones del motor de inferencia son:

- Determinación de las acciones que tendrá lugar, el orden en que lo harán y como lo harán entre las diferentes partes del sistema experto.
- Determinar cómo y cuándo se procesarán las reglas, y dado el caso también la elección de que reglas deberán procesarse.
- Control de dialogo con el usuario.

- **Base de Hechos**

Memoria temporal de trabajo: Contiene información sobre el problema particular que el sistema experto debe resolver.

- **Interfaz de Usuario**

Comunicación entre el Sistema Experto y el usuario final, por ello es necesario mostrar y obtener información de forma clara, fácil y agradable; sirve para que se pueda realizar una consulta en un lenguaje lo más natural posible. Éste componente es la forma en la que el sistema se presenta ante el usuario.

Requisitos o características de la interface que se presenta al usuario al desarrollar el sistema experto:

- Manejo rápido.
- Debe evitarse en lo posible la entrada de datos erróneos.
- Los resultados deben presentarse en una forma clara para el usuario.
- Las preguntas y explicaciones deben ser comprensibles.

- **Modo de Explicación**

Explica al usuario la estrategia de solución encontrada y el porqué de las decisiones tomadas; las soluciones descubiertas por los expertos deben poder ser repetibles, esto es, las conclusiones deben de ser congruentes, exactas, congruentes y exactas en los resultados.

El usuario puede pedir explicación de las conclusiones obtenidas o de las acciones que realiza el sistema experto.

1.6 CARACTERÍSTICAS DEL SISTEMA EXPERTO ⁷

Los Sistemas Expertos deben cumplir con algunas características indispensables para que su funcionamiento no se vea afectado y más que nada para ser tratado como Sistema Experto.

Un SE debe tener la capacidad para llegar de forma rápida y certera a la solución de nuestro problema, es decir, el experto humano debe tener conocimientos certeros y amplios del campo de su especialidad o del campo que va a diagnosticar, teniendo total experiencia para la toma de decisiones. Esta habilidad es generalmente la que más se espera que un sistema experto posea.

Debe ser de naturaleza heurística, es decir, debe tener una actitud de búsqueda para la resolución de los problemas, aquí las soluciones se descubren por la evaluación del progreso logrado en la exploración de un resultado final.

Además debe tener una habilidad para explicar los resultados a la persona que no cuenta con esos conocimientos, además de poder justificar por qué escogió esa solución, el sistema debe cumplir con la capacidad de responder en forma clara, las preguntas concernientes a razones de los mismos resultados, el razonamiento de estos mismos y las implicaciones subsecuentes; generalmente, las personas que no cuentan con el conocimiento esperan recibir una respuesta más práctica y que se acerque a las condiciones que ellos podrían entender.

Un sistema experto debe reestructurar y reorganizar el conocimiento para que se adapte al ambiente, aquí el sistema debe ser capaz de dividir su información para ocupar la parte útil que sirve a la resolución del problema, con esto reduce tiempo, y al dividir la información, organiza su conocimiento.

⁷ Ibíd., p. 25.

Los SE cuentan en su mayoría con una habilidad para adquirir nuevo conocimiento y aprender de las experiencias, los expertos humanos deben de aprender tanto de sus propias experiencias como de la experiencia de los demás, están obligados a estar al día en cuanto a la base del conocimiento, así como a modificar el proceso de su razonamiento. Un Sistema Experto que no se mantiene al día con sus conocimientos a la larga se vuelve obsoleto. Muchas veces los SE son creados para tener las siguientes características:

- Alto desempeño: Tener respuestas a un nivel mayor o superior que los especialistas.
- Tiempo de respuesta adecuado: Deben trabajar en tiempo real ya sea en un intervalo de tiempo o con mucha rapidez.
- Confiabilidad: El sistema experto debe ser confiable y no propenso a errores.
- Comprensible: Explicar cada una de sus decisiones, así como de los pasos que siguió para lograr sus razonamientos.

1.6.1 Ventajas de los sistemas expertos

Los sistemas expertos nos dan una ayuda muy útil para la toma de decisiones, de éste modo se crearon sistemas expertos para tareas genéricas, es decir para la monitorización y el diagnóstico, además de los trabajos de simulación de la realidad tales como en plantas de energía, grandes industrias, cohetes, control de tráfico aéreo, búsqueda de yacimientos petrolíferos, prevención de desastres naturales, diagnóstico del clima, evitar enfermedades y hasta hospitales.

Los SE muestran las siguientes ventajas:

- Mayor disponibilidad: Un sistema experto siempre está disponible para su uso y sobre todo siempre está actualizado y con conocimientos generados a través de la experiencia.

- Costo reducido: Un costo bajo por tener un experto al alcance en todo momento y en un tema específico.
- Permanencia: La experiencia es permanente, a diferencia de los expertos humanos que pueden retirarse.
- Experiencia múltiple: Puede un sistema experto aprender de otro sistema experto y crecer sus conocimientos aún más que los especialistas juntos.
- Mayor confiabilidad: Como contiene conocimientos de expertos y de otros sistemas expertos siempre es conveniente creer en sus decisiones.
- Explicación: El sistema experto puede explicar con claridad y detalladamente las decisiones que está tomando, lo que aumenta con esto su confianza en la toma de decisiones correctas.
- Respuesta rápida: Muchas veces algunas aplicaciones necesitan de respuestas rápidas y primordialmente que sean de confianza, un sistema experto puede proporcionar respuestas más rápidas que las de un experto humano.
- Tutoría inteligente: El sistema experto puede actuar como un tutor inteligente dejando que un usuario o cualquier persona interesado en áreas especiales ejecute programas de ejemplo y explicando sus razonamientos.
- Base de datos inteligente: Un SE puede obtener información de una base de datos y realizar cálculos numéricos mucho más rápido que cualquier ser humano, lo puede hacer de forma automática, y hacer cálculos con esos datos.

1.6.2 Limitaciones de los sistemas expertos

Un Sistema Experto tiene limitaciones, algunas de ellas son:

- Sentido común: Para un Sistema Experto no hay nada obvio. Por ejemplo, un sistema experto sobre nutrición se le debe especificar algunos datos con el sexo, el color de piel y otros datos cuando un experto humano lo deduce con el sentido de la vista.

- Lenguaje natural: Con un experto humano podemos mantener una conversación informal mientras que con un SE no podemos.
- Capacidad de aprendizaje: Cualquier persona aprende con relativa facilidad de sus errores y de errores ajenos, que un SE haga esto es muy complicado.
- Perspectiva global: Un experto humano es capaz de distinguir cuales son las cuestiones relevantes de un problema y separarlas de cuestiones secundarias.
- Capacidad sensorial: Un SE carece de sentidos, lo que muchas veces el experto humano le ayuda hacer bien su trabajo.
- Flexibilidad: Un humano es sumamente flexible a la hora de aceptar datos para la resolución de un problema, el SE es directo en su decisión.
- Conocimiento no estructurado: Un SE no es capaz de manejar conocimiento poco estructurado.
- El conocimiento es difícil de extraer de los expertos humanos.
- La aproximación de cada experto a la situación evaluada puede ser diferente.
- Tienen una noción muy limitada acerca del contexto de problema, no pueden percibir todas las cosas que un experto humano puede apreciar de una situación.
- Pueden existir decisiones que sólo son de competencia para un ser humano y no una máquina.

1.7 TAREAS QUE REALIZAN LOS SISTEMAS EXPERTOS ⁸

Los Sistemas Expertos, ofrecen grandes posibilidades y sus aplicaciones son de gran utilidad en temas tan variados que pueden ir desde la medicina hasta la enseñanza pasando por el CAD. En las empresas, los Sistemas Expertos empiezan a tener cada vez mayor auge, hasta el punto de ir suponiendo un punto de referencia importante en la toma de decisiones para la junta directiva.

En realidad, incluso se podría decir que el límite de las aplicaciones objeto de los Sistemas Expertos está en la imaginación humana, siendo siempre de utilidad allí

⁸ CAMACHO JUAREZ, CERVANTES BIRUETE. Op. cit., p. 21,23.

donde se necesite un experto. Según la clase de problemas hacia los que estén orientados, podemos clasificar los Sistemas Expertos en diversos tipos entre los que cabe destacar diagnóstico, pronóstico, planificación, reparación e instrucción; vamos a ver algunas de las aplicaciones existentes (o en periodo de desarrollo) para cada uno de los campos citados.

○ **Interpretación, diagnóstico y monitoreo**

La interpretación consiste en encontrar el significado de los datos de entrada obtenidos por sensores o introducidos por el usuario. Con frecuencia aparecen datos contradictorios, incompletos o inexactos, por lo que hay que dotar al SE de conocimiento para resolver un problema de este tipo, y que de todas formas llegue a una resolución. Existen dos tipos de interpretación:

- **Análisis:** La interpretación de datos se obtiene mediante la separación o distinción de las partes que forman los datos.
- **Síntesis:** La interpretación de los datos se obtiene mediante la combinación de los mismos.

El diagnóstico consiste en identificar las causas internas que provocan un problema, avería o disfunción a partir de una serie de datos o síntomas que son consecuencia de la misma y que son observables. Los SE en diagnóstico encuentran múltiples dificultades a la hora de realizar su tarea como son las siguientes:

- **Manifestaciones Nuevas.** Es decir, síntomas que no se habían observado con anterioridad.
- **Causas Nuevas.**
- **Manifestaciones debidas a varias causas.**
- **Datos Inaccesibles, caros o de obtención peligrosa.**
- **Relaciones no biyectivas entre los datos y las causas.**

- Fallos o averías de aparición intermitente.
- Existencia de varios fallos simultáneos o en cadena.

La monitorización es un caso particular de la interpretación, y consiste en la comparación continua de los valores de las señales o datos de entrada y unos valores que actúan como criterios de normalidad o estándares. En el campo del mantenimiento predictivo los Sistemas Expertos se utilizan fundamentalmente como herramientas de diagnóstico. Se trata de que el programa pueda determinar en cada momento el estado de funcionamiento de sistemas complejos, anticipándose a los posibles incidentes que pudieran acontecer. Así, usando un modelo computacional del razonamiento de un experto humano, proporciona los mismos resultados que alcanzaría dicho experto.

- **Diseño y selección**

El diseño se puede concebir de distintas formas:

- El diseño en ingeniería es el uso de principios científicos, información técnica e imaginación en la definición de una estructura mecánica, máquina o sistema que ejecute funciones específicas con el máximo de economía y eficiencia.
- El diseño industrial busca rectificar las omisiones de la ingeniería, es un intento consiente de traer forma y orden visual a la ingeniería de hardware donde la tecnología no provee estas características.
- Diseño es el proceso de especificar una descripción de un artefacto que satisface varias características desde un número de fuentes de conocimiento.

Los SE en diseño ven este proceso como un problema de búsqueda de una solución óptima o adecuada. Las soluciones alternas pueden ser conocidas de antemano (problemas de derivación) o se pueden generar automáticamente (problemas de formulación).

Los SE prueban distintos diseños para verificar cuáles de ellos cumplen los requerimientos solicitados por el usuario, ésta técnica es llamada “generación y prueba”, por lo tanto, estos SE son llamados de selección. En áreas de aplicación, la prueba se termina cuando se encuentra la primera solución; sin embargo, existen problemas más complejos en los que el objetivo es encontrar la solución más óptima. La utilidad de los programas basados en conocimientos aplicados a la ciencia y a la ingeniería no se limita al análisis sofisticado, muchos programas recientes han empezado a trabajar en la síntesis.

○ **Planificación**

La planificación es la realización de planes o secuencias de acciones y es un caso particular de la simulación. Está compuesto por un simulador y un sistema de control. El efecto final es la ordenación de un conjunto de acciones con el fin de conseguir un objetivo global (costo mínimo, tiempo mínimo, etc). Los problemas que presentan la planificación mediante SE son los siguientes:

- Existen consecuencias no previsibles, de forma que hay que explorar y explicar varios planes.
- Existen muchas consideraciones que deben ser valoradas o incluirles un factor de peso.
- Suelen existir interacciones entre planes de sub-objetivos diversos, por lo que deben elegirse soluciones de compromiso.
- Trabajo frecuente con incertidumbre, pues la mayoría de los datos con los que se trabaja son más o menos probables, pero no seguros.
- Es necesario hacer uso de fuentes diversas tales como bases de datos.

○ **Control**

Un sistema de control participa en la realización de las tareas de interpretación, diagnóstico y reparación de forma secuencial. Con ello se consigue conducir o guiar un proceso o sistema.

Los sistemas de control son complejos debido al número de funciones que deben manejar y el gran número de factores que deben considerar; esta complejidad creciente es otra de las razones que apuntan al uso del conocimiento, y por tanto de los SE.

Cabe aclarar que los sistemas de control pueden ser en lazo abierto, si en el mismo la realimentación o el paso de un proceso a otro lo realiza el operador, o en lazo cerrado si no tiene que intervenir el operador en ninguna parte del mismo.

○ **Simulación, pronóstico o predicción**

La simulación es una técnica consistente para crear modelos basados en hechos, observaciones e interpretaciones, sobre la computadora, a fin de estudiar el comportamiento de los mismos mediante la observación de las salidas para un conjunto de entradas.

El empleo de los SE para la simulación viene motivado por la principal característica de los SE, que es su capacidad para la simulación del comportamiento de un experto humano, que es un proceso complejo. En la aplicación de los SE para simulación hay que diferenciar cinco configuraciones posibles:

- Un SE puede disponer de un simulador con el fin de comprobar las soluciones y en su caso rectificar el proceso que sigue.
- Un sistema de simulación puede contener como parte del mismo a un SE y por lo tanto el SE no tiene que ser necesariamente de simulación.
- Un SE puede controlar un proceso de simulación, es decir que el modelo está en la base de conocimiento del SE y su evolución es función de la base de hechos, la base de conocimientos y el motor de inferencia, y no de un conjunto de ecuaciones aritmético - lógicas.
- Un SE puede utilizarse como consejero del usuario y del sistema de simulación.

- Un SE puede utilizarse como máscara o sistema frontal de un simulador con el fin de que el usuario reciba explicación y justificación de los procesos.

Los sistemas de pronóstico deducen consecuencias posibles a partir de una situación. Su objetivo es determinar el curso del futuro en función de información sobre pasado y presente. Esto abarca diversos problemas, tales como predicciones meteorológicas, predicciones demográficas, o incluso previsiones de la evolución bursátil entre otros.

2. BOMBEO ELECTROSUMERGIBLE

El bombeo electrosumergible es un método que se comenzó a utilizar en Venezuela en 1958, con el pozo silvestre 14. Se considera un método de levantamiento artificial que utiliza una bomba centrífuga ubicada en el subsuelo para levantar los fluidos aportados por el yacimiento desde el fondo del pozo hasta la estación de flujo. La técnica para diseñar las instalaciones de bombeo electrosumergible consiste en: seleccionar una bomba que cumpla los requerimientos de la producción deseada, de asegurar el incremento de presión para levantar los fluidos, desde el pozo hasta la estación, y escoger un motor capaz de mantener la capacidad de levantamiento y la eficiencia del bombeo.

2.1 APLICACIÓN ⁹

Este es un método de levantamiento artificial altamente eficiente y aplicable para la producción de crudos livianos y medianos con baja presión de fondo, alta relación agua-petróleo, baja relación gas-petróleo y con alto levantamiento o energía. Sin embargo, es uno de los métodos de extracción de crudo que exige mayor requerimiento de supervisión, análisis y control, a fin de garantizar el adecuado comportamiento del sistema.

Éste ha probado ser un sistema artificial de producción eficiente y económico. En la actualidad ha cobrado mayor importancia debido a la variedad de casos industriales en los que es ampliamente aceptado. En la industria petrolera, comparativamente con otros sistemas artificiales de producción tiene ventajas y desventajas, debido a que por diversas razones no siempre puede resultar el mejor.

El sistema de bombeo electrosumergible (BES) ha demostrado ser una alternativa altamente eficiente para la producción de crudos livianos y medianos en el ámbito

⁹ AGUILAR APOLO. Op. cit., p. 19.

mundial, gracias a las ventajas que proporciona en comparación con cualquier otro método de levantamiento artificial.

Este sistema posee la capacidad de manejar grandes volúmenes de crudo, desde 150 hasta 100.000 barriles por día (BPD), desde profundidades hasta de 4.572 metros. Además de esto, el sistema BES permite controlar y programar la producción dentro de los límites del pozo, a través del empleo del variador de frecuencia.

Otro de los beneficios que proporciona este método, es la indicación continua de las condiciones de presión y temperatura en el pozo, gracias a las señales transmitidas por el sensor de presión y temperatura ubicado en el fondo pozo.

Tabla 1. Screening de aplicación

PARAMETROS	CONDICIÓN IDEAL
Temperatura	>350°F (motores y cables especiales)
Presencia de gas	Sat. Gas libre < 10%
Presencia de arena	< 200 ppm
Viscosidad	cerca de 200cp
Profundidad	6000 - 8000 ft
Tipo de completación	Tanto en pozos verticales, como desviados
Volumen de fluido	Hasta 4000 BPD

2.2 PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO ¹⁰

Tiene como principio fundamental levantar el fluido del reservorio hasta la superficie, mediante la rotación centrífuga de la bomba electrosumergible. La potencia requerida por dicha bomba es suministrada por un motor eléctrico que se encuentra ubicado en el fondo del pozo; la corriente eléctrica, necesaria para el funcionamiento de dicho motor, es suministrada desde la superficie, y conducida a través del cable de potencia hasta el motor.

¹⁰ *Ibíd.*, p. 37.

El Sistema BES representa uno de los métodos más automatizables y fácil de mejorar, y está constituido por equipos complejos y de alto costo, por lo que se requiere, para el buen funcionamiento de los mismos, de la aplicación de herramientas efectivas para su supervisión, análisis y control.

2.3 VENTAJAS

- Puede levantar altos volúmenes de fluidos (>100000 Bls/d).
- Maneja altos cortes de agua (Aplicables en costa a fuera).
- Puede usarse para inyectar fluidos a la formación.
- Su vida útil puede ser muy larga.
- Aplicable en pozos direccionales y horizontales, (dependiendo del ángulo de desviación. Normalmente <de 9°/100 pies).
- Fácil aplicación de tratamientos contra la corrosión y formaciones de escamas.
- El costo de levantamiento por barril disminuye al incrementar la tasa de flujo.
- Se pueden monitorear, mediante controles automatizados.

2.4 LIMITACIONES

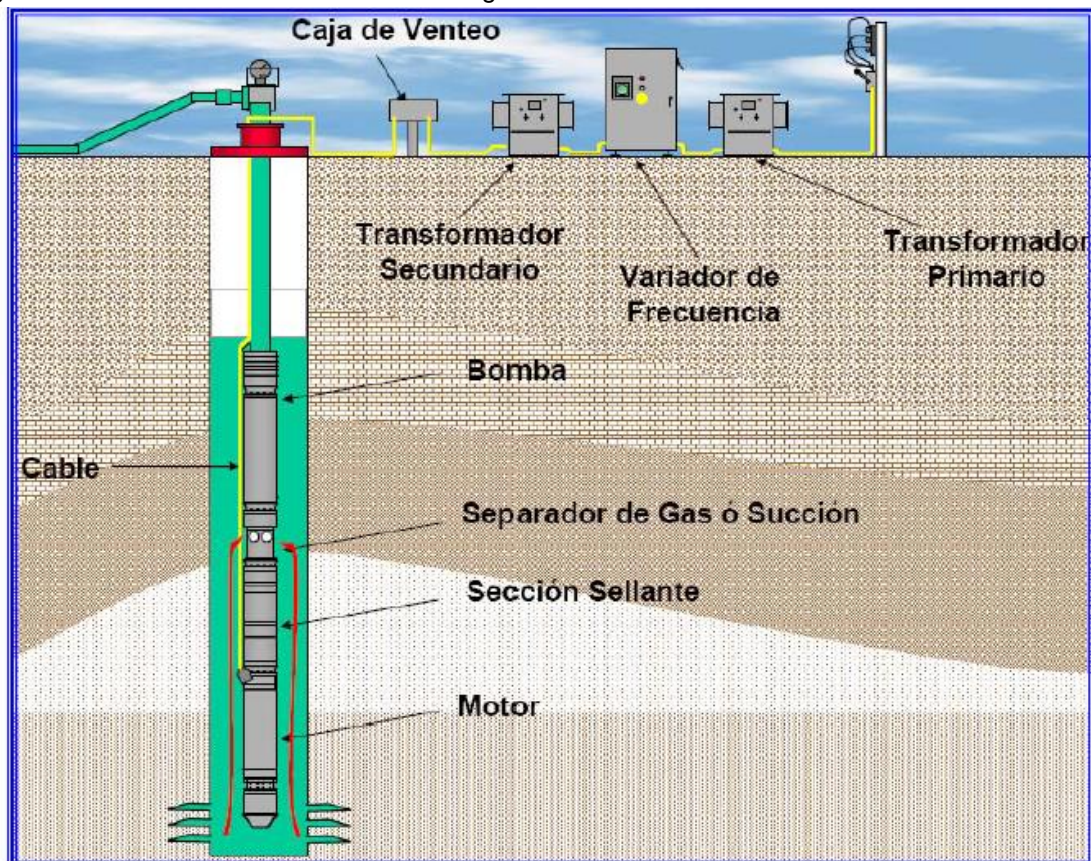
- Inversión inicial muy alta.
- Alto consumo de potencia.
- No es rentable en pozos de baja producción.
- Los cables se deterioran al estar expuestos a temperaturas elevadas.
- Susceptible a la producción de gas y arena.
- Las bombas y motor son susceptibles a fallas.
- Es un sistema difícil de instalar y su energización no siempre es altamente confiable.
- Su aplicación se limita a profundidades medias, principalmente por la degradación del aislamiento del cable y limitaciones de temperatura de motor/sello.

2.5 COMPONENTES DEL BOMBEO ELECTROSUMERGIBLE

Una unidad típica convencional del Sistema de Bombeo Electrosumergible se compone básicamente de equipos de fondo, equipos de superficie y accesorios. La Figura 1 muestra los equipos de superficie y fondo. El conjunto de equipos de fondo se encuentra constituido por el sensor de fondo, motor electrosumergible, sección sellante, separador de gas, bomba electrosumergible y cable de potencia.

Los equipos de superficie están conformados por el generador de potencia eléctrica, transformadores, variadores de frecuencia, caja de venteo, cuarto de control, cable de superficie y el cabezal de pozo. Entre los accesorios se están la válvula de retención, válvula de drenaje, flejes, acoplamientos, centralizador y el housing.

Figura 1. Sistema de bombeo electrosumergible



Fuente: VÁSQUEZ LEAL, José Antonio. Evaluación del método de levantamiento artificial por bombeo electrosumergible para su aplicación en el área mayor de oficina del distrito gas Anaco.

2.5.1 Equipos de Superficie

2.5.1.1 Generador de potencia eléctrica

Equipo que genera la potencia eléctrica necesaria para la operación del equipo de fondo. Generalmente en los primeros años de operación de los campos se utilizan moto-generadores. Posteriormente, se mantiene la mitad de la potencia con generación propia y la otra parte utilizando la producción de energía a nivel Nacional "ISA".

2.5.1.2 Transformadores ¹¹

Los transformadores son usados para convertir el voltaje al requerido por los equipos del Bombeo Electrosumergible, existe el transformador reductor y elevador. El transformador reductor (SDT) baja el voltaje desde las líneas de distribución de 13,8 KV o 34,5 kV al requerido por los variadores que generalmente oscila entre 460V y 480V. La tensión de salida del variador es generalmente inferior a la requerida por el motor, por eso se usa un transformador elevador (SUT) que sube el voltaje hacia el requerido por el motor que generalmente se encuentra entre 1000V-3760V.

Figura 2. Transformador SDT



Figura 3. Transformador SUT



Fuente: Bombeo electrosumergible, BAKER HUGHES ALS.

¹¹ BACÓN PAREDES, Fernando Giovanni. Estudio del sistema de bombeo electrosumergible, del campo Lago Agrio, mediante el software Subpump 7.0. Quito-Ecuador, 2010.

2.5.1.3 Variador de frecuencia

El Variador de Frecuencia se instala entre los transformadores reductor y elevador, y es un sistema para controlar la velocidad del motor de corriente alterna, controlando la frecuencia de voltaje aplicado, es decir, este sistema permite que el motor de la bomba trabaje a diferentes velocidades. La utilización de un variador de frecuencia permite:

- Mejorar la eficiencia del sistema.
- Maximizar la producción de los pozos.
- Aislamiento de los equipos de fondo.
- Provee un Arranque con voltaje reducido.

Figura 4. Variador de frecuencia



Fuente: Baker Hughes- Artificial Lift System

2.5.1.4 Caja de venteo

Es también conocida como caja de conexiones, por que realiza tres funciones:

- Proporciona un punto para conectar el cable proveniente del controlador al cable del pozo.
- Proporciona un desfogue a la atmósfera, para el gas que pueda migrar por el cable de potencia desde el fondo del pozo.
- Proporciona puntos de prueba fácilmente accesibles para la revisión eléctrica de los equipos de fondo.

2.5.1.5 Cable de superficie

El cable de superficie conecta la caja de venteo con el variador de frecuencia, y a su vez el VSD con el lado secundario del transformador, existe una longitud máxima del cable para cada sección del cable en superficie.

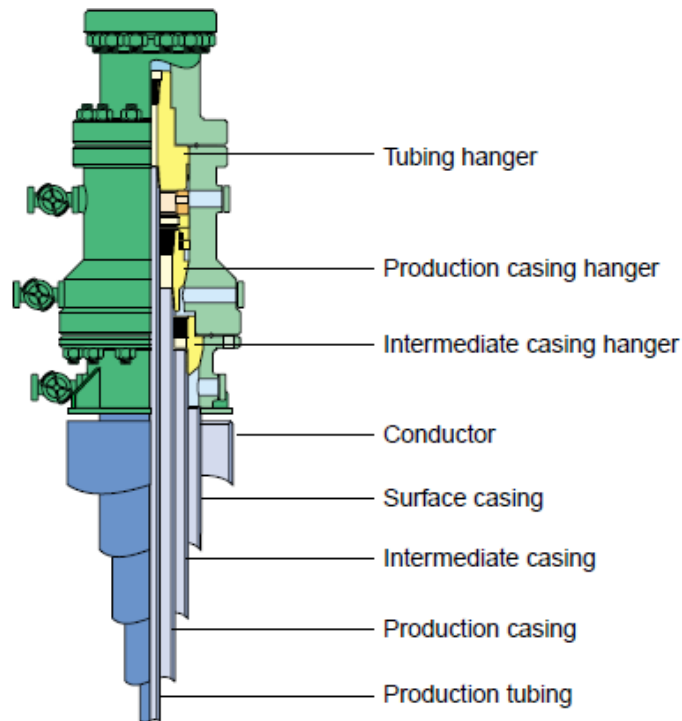
2.5.1.6 Cabezal de pozo

El cabezal del pozo está diseñado para hacer el cierre del pozo en superficie, soportar el peso del equipo y se usa para mantener control sobre el espacio anular del pozo. Está equipado con una empaquetadura que proporciona un sello positivo alrededor del cable y de la tubería de producción.

Hay varios métodos disponibles de los fabricantes de cabezas de pozo para lograr su empaquetamiento, dependiendo del método empleado, el empaquetamiento podrá resistir presiones diferenciales que alcanzan los 10.000 psi. Existen cabezales de altas presiones, sobre los 3000 psi, éstos usan una alimentación de energía eléctrica para prevenir la migración del gas a través del cable. Los

cabezales son fabricados para el tamaño estándar de tuberías de revestimiento desde 4.5 a 10 pulgadas de diámetro.

Figura 5. Cabezal de pozo



Fuente: <http://www.industrimigas.com/>

2.5.2 Equipos de fondo

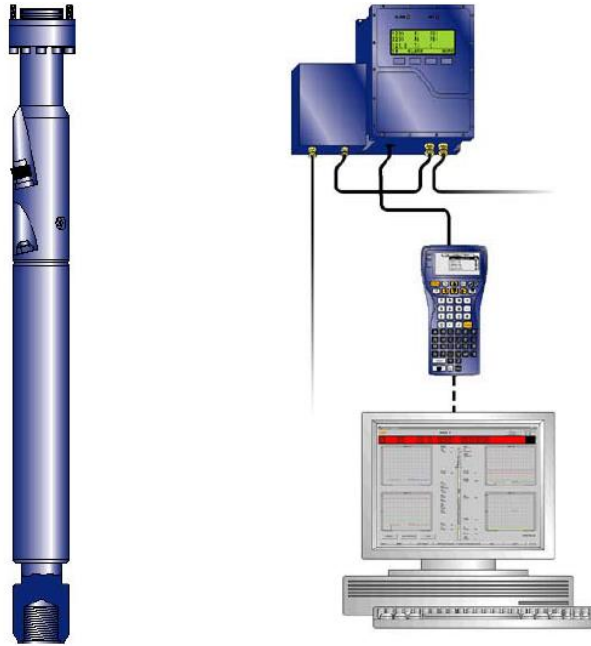
2.5.2.1 Sensor de fondo ¹²

Datos importantes del yacimiento y del desempeño de la bomba están disponibles con el uso de sistemas de monitoreo de presión y temperatura. Correlacionando la presión del yacimiento con la tasa de flujo, un operador puede determinar cuándo cambiar el diseño de la bomba o considerar un workover en el pozo. Los sistemas típicos tienen la capacidad de:

¹² API RP 11S4. Recommended Practice for Sizing and Selection of Electric Submersible Pump Installations. First Edition, May 1993.

- Continuamente monitorear la presión y temperatura de fondo.
- Proveer la detección de fallas eléctricas.

Figura 6. Sensor de fondo



Fuente: SCHLUMBERGER-ARTIFICIAL LIFT

2.5.2.2 Motor electrosumergible

El Motor Electrosumergible utilizado para la operación de las bombas es un motor eléctrico con estator bobinado de inducción bipolar trifásico y rotor tipo jaula de ardilla el cual opera a una velocidad de 3600 revoluciones por minuto “RPM” a una frecuencia de 60 Hz, dicha relación expresada por la Ecuación 1.

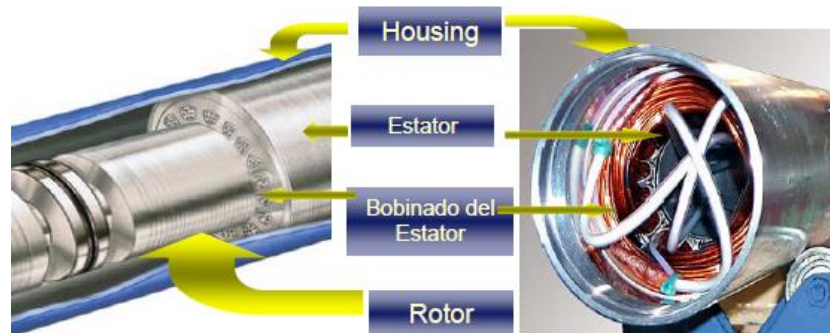
$$N_r = \frac{120 * f}{P}$$

Ecuación 1

El principal propósito de un motor es convertir la energía eléctrica en movimiento que gire al eje.

El eje está conectado a través del sello y el separador de gas y gira los impulsores de la bomba, de esta forma el motor electrosumergible provee la energía que necesita la bomba para rotar y acelerar los fluidos que están siendo bombeados hacia la superficie.

Figura 7. Partes del motor



Fuente: SCHLUMBERGER-ARTIFICIAL LIFT

Componentes del motor electrosumergible ¹³

- **Rotor:** Es uno de los componentes internos del motor y es el que genera los HP del motor, por ejemplo, en un motor de 180 HP y si el motor consta de 10 rotores, cada uno de ellos está aportando 18 HP. Los rotores se encuentran localizados dentro de la circunferencia interna del estator.
- **Estator:** Es el bobinado del motor electrosumergible y viene encapsulado, está diseñado para trabajar a diferentes temperaturas y para su aplicación en los pozos BES se debe tener en cuenta varios factores, tales como la temperatura de fondo del pozo, la posición de sentado, etc.
- **Cojinete de motor:** Son componentes internos del motor electrosumergible y elementos estáticos, cuya función principal es fijar y centralizar el conjunto de rotores. En toda configuración del motor, entre rotor y rotor existe un cojinete.

¹³ BACÓN PAREDES. Op. cit., p. 41.

- **T ring:** Anillo en forma de T, este anillo tiene la función de expandirse por acción del aceite y temperatura contra las paredes del estator y no permitir que el cojinete gire.
- **Eje del motor:** Es el componente interno del motor electrosumergible que hace girar el sistema; es un eje hueco mecanizado y perforado para hacer llegar aceite a todos los cojinetes del motor, como así también la de soportar los esfuerzos del torque.
- **Housing del motor:** Es la cubierta del motor, está provisto de roscas en ambos extremos para facilitar la instalación del cabezal y la base del motor electrosumergible, los diámetros varían según los fabricantes y principalmente del diámetro que se dispone en cada pozo.
- **Aceite dieléctrico:** Es un aceite mineral o sintético que provee la lubricación y enfriamiento de los componentes internos del motor electrosumergible. Está diseñado para trabajar a diferentes temperaturas.

2.5.2.3 Sección sellante

El protector o sección sellante está ubicado entre la parte superior del motor y la parte inferior de la bomba, puede ser instalado como una unidad simple o como una unidad en tándem. El sello cumple algunas funciones específicas entre las que destacamos:

- ✓ Provee el volumen necesario para permitir la expansión del aceite dieléctrico contenido en el motor.
- ✓ Iguala la presión externa del fondo de pozo con el fluido dieléctrico interno del motor.
- ✓ Proteja al motor de la contaminación de los fluidos del pozo.
- ✓ Absorbe el empuje axial descendente de la bomba.

Figura 8. Sección sellante



Fuente: Baker Hughes Services International Inc

2.5.2.4 Separador de gas

Los Separadores de Gas se usan cuando el gas libre causa interferencia con el rendimiento de la bomba. El Separador de Gas está diseñado para prevenir que gran parte del gas libre entre a la bomba, previene la cavitación y puede utilizarse tanto en forma sencilla como en tándem.

La cámara rotativa de diseño especial actúa como una centrífuga, obliga a los fluidos pesados a dirigirse hacia las paredes exteriores y deja que el gas migre hacia el centro de la cámara. El gas libre es físicamente separado del resto de los fluidos al final del separador, el fluido es dirigido hacia la toma de la bomba y el gas es venteado hacia el espacio anular.

Figura 9. Separador de gas



Fuente: Baker Hughes-Artificial Lift System

2.5.2.5 Bomba electrosumergible ¹⁴

Son del tipo centrífugo de múltiples etapas, cada etapa consiste de un impulsor (dinámico) y un difusor (estático). El número de etapas determina la carga total generada y la potencia requerida, están diseñadas para cubrir una amplia gama de volúmenes y están construidas y aplicadas en diferentes diámetros dependiendo del espacio disponible en el pozo (diámetro del Casing), y se clasifican según series.

Tabla 2. Tamaños y capacidades de producción Bombas

Series	Diámetro exterior (OD) – in	Caudales (BFPD @ 60 Hz)
338	3.38	340 a 3100
400P	4.00	120 a 6800
538P	5.38	750 a 1200
562	5.62	7000 a 24000
675	6.75	5000 a 48000
875	8.75	13700 a 33400

Fuente: Baker Hughes – Artificial Lift System

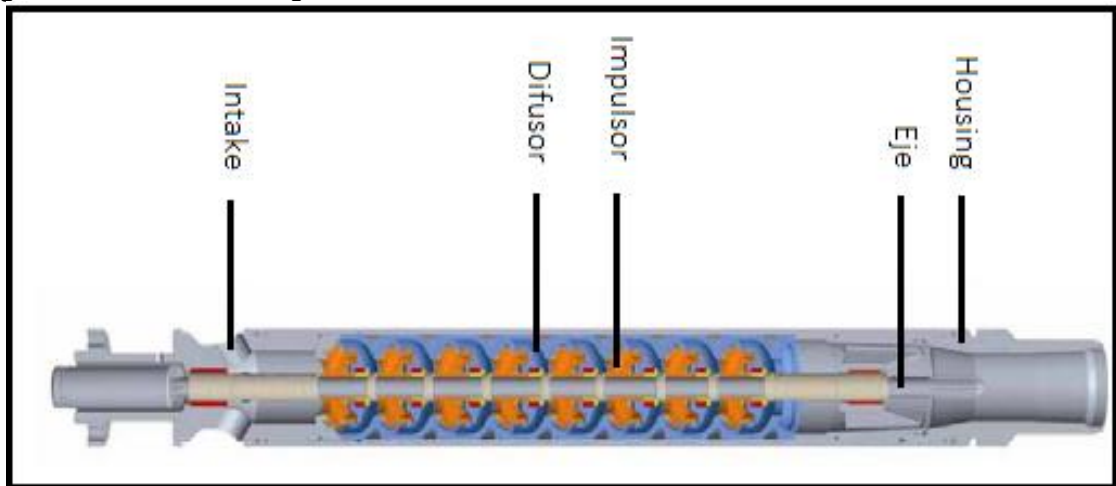
La bomba centrífuga trabaja por medio de la transferencia de energía del impulsor al fluido, desplazándolo como si fuera un acelerador de partículas, esta energía o fuerza tangencial se produce en los álabes del impulsor cuando la bomba está en

¹⁴ BACÓN PAREDES. Op. cit., p. 41, 46.

funcionamiento (girando), el cambio de presión a energía se lleva a cabo mientras el líquido bombeado rodea al impulsor, a medida que esta gira, imparte un movimiento giratorio al fluido el cual se divide en dos componentes.

Uno de estos movimientos es radial hacia afuera del centro del impulsor y es causado por una fuerza centrífuga, y el otro movimiento va en la dirección tangencial al diámetro externo del impulsor. La resultante de estos dos componentes es la dirección del flujo.

Figura 10. Bomba centrífuga



Fuente: Baker Hughes – Artificial Lift System

Componentes de la Bomba centrífuga

- **Cabeza y Base:** La base de la bomba es un elemento que permite acoplarse con otra bomba, con un separador de gas o con la succión del sistema de Bombeo Electrosumergible; mientras que el cabezal o cabeza de bomba permite acoplarse a la descarga o hacia otra bomba en el caso de conexión entre bomba superior e inferior al igual que en la base.
- **Descarga:** Es una adaptación en la que cuelga todo el conjunto de fondo y ésta a su vez permite el acople con la tubería de producción.

- **Housing de la Bomba:** Es el recubrimiento externo de la bomba Electrosumergible, cubre y protege a los componentes internos.
- **Eje de la Bomba:** Es aquel en el cual se aloja los componentes de la bomba, pueden tener diferentes valores de resistencia a la tracción, dependiendo de su material y diámetro, está conectado al eje del motor a través del separador de gas y del sello y gira con la RPM del motor.
- **Impulsor:** Es la parte rotativa del sistema, genera fuerzas centrifugas que aumentan la velocidad del fluido, el fluido entra al impulsor por medio de un orificio interno, cercano al eje y sale por el diámetro exterior dirigiendo el fluido hacia el siguiente impulsor.
- **Difusor:** Considerada la parte estacionaria, dirige el fluido de la forma adecuada al siguiente impulsor y transforma parte de la energía cinética en energía potencial o presión.
- **Etapas de la Bomba:** Una etapa de la bomba se forma mediante la combinación de un impulsor y un difusor (Ver Figura 11). El número de etapas de la bomba va a estar determinado por la presión requerida en la cabeza del pozo, la profundidad de levantamiento y el volumen de fluido a ser producido.

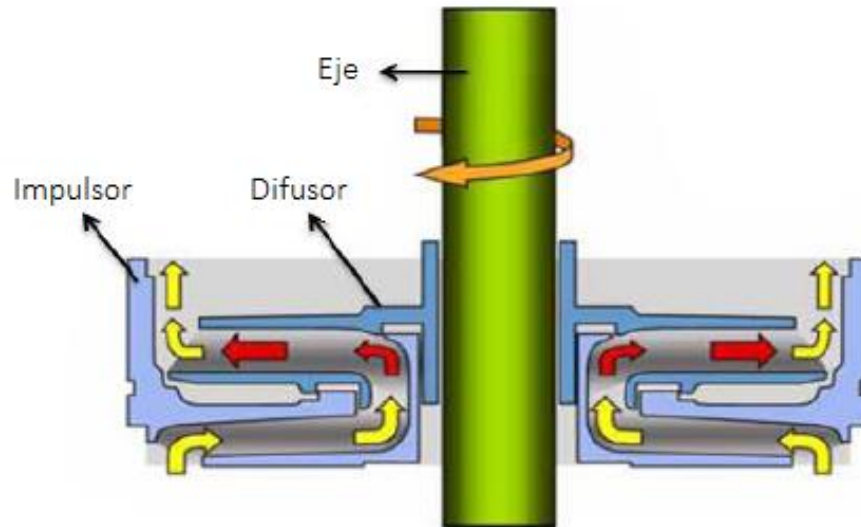
Figura 11. Impulsor y difusor



Fuente: Baker Hughes – Artificial Lift System

En la Figura 12 se observa una ilustración de un corte de una etapa, que muestra el impulsor acoplado al difusor, la trayectoria del fluido y la rotación del eje.

Figura 12. Una etapa de la bomba electrosumergible



Fuente: Baker Hughes – Artificial Lift System

2.5.2.6 Cable de Potencia ¹⁵

El cable de potencia es un conductor de tres fases, a través del cual se transmite desde superficie la corriente eléctrica requerida para el motor. La temperatura, el voltaje y la corriente del motor determinan el tipo de cable a utilizarse.

En términos generales el cable está compuesto por tres elementos: Tres conductores en cobre, elemento aislante para cada conductor fabricado en caucho-polipropileno de alta rigidez dieléctrica, una chaqueta protectora y un blindaje en acero galvanizado o inoxidable. Los fabricantes han clasificado los cables en números de 1 al 6 de acuerdo a su capacidad, donde el número uno es el de menor resistencia al flujo de corriente.

¹⁵ MÁRQUEZ, Richard. Diseño y optimización de un sistema de levantamiento artificial por bombeo hidráulico. Universidad de Zulia, Maracaibo, 2010.

2.5.3 Accesorios ¹⁶

2.5.3.1 Válvula de retención

La Válvula de Retención también conocida como standing valve tiene por función mantener una columna llena de fluido por encima de la descarga de la bomba, no permitiendo así un retorno cuando el equipo de fondo está parado.

Figura 13. Válvula de retención



Fuente: Baker Hughes – Artificial Lift System

2.5.3.2 Válvula de drenaje

La instalación de esta válvula está recomendada de uno a dos tubing por encima de la válvula de retención, y su función es la de vaciar la columna de fluido de la tubería de producción. Si no hay válvula de retención instalada no hay razón para que exista una válvula de drenado, ya que el fluido de la tubería por lo general es drenado a través de la bomba cuando se realiza el pulling.

2.5.3.3 Flejes

El cable de extensión del motor y el cable de potencia se mantienen sujetos a la tubería de producción por unas bandas metálicas selladas que aseguran el cable

¹⁶ BACÓN PAREDES. Op. cit., p. 41, 46, 49.

para que este no se deslice y forme curvaturas que pueden ser dañadas. La función principal además de la de sostener al cable es la de mantener éste lo más vertical posible con respecto a la tubería de producción.

2.5.3.4 Acoplamientos

Son los conectores cilíndricos con estrías que conectan los ejes de las diferentes piezas del aparejo: motor-motor, motor-sello, bomba-bomba, etc. Los acoplamientos que unen a los ejes poseen distintas resistencias tanto a la torsión como los agentes químicos del fluido de fondo de pozo y son únicos para la conexión en que se usan.

Figura 14. Acoplamientos



Fuente: Baker Hughes – Artificial Lift System

2.5.3.5 Centralizador

Los centralizadores son frecuentemente utilizados en aplicaciones del sistema BES para ubicar el equipo en el centro del pozo y son especialmente útiles en pozos desviados, para eliminar el daño externo y para asegurar la refrigeración uniforme del equipo.

3. DESARROLLO DEL SISTEMA EXPERTO EN DISEÑO BES

NAVA se diseña para casos cuando el sistema de levantamiento artificial por bombeo electro sumergible ha sido designado como sistema de producción en un pozo petrolero. NAVA presenta una interfaz de diseño que se soporta en un sistema experto como acompañamiento en el proceso, además de una interfaz de seguimiento.

La estructura principal de la interfaz de diseño se establece a partir de una revisión bibliográfica de las principales metodologías existentes para el diseño de sistemas BES. Estas son: la metodología Baker Hughes empleada en el software AutographPC, la metodología Schlumberger empleada en el software SubPUMP y una metodología alternativa propuesta por Daniel Bustamante.

A su vez, a medida que se desarrolla el diseño en NAVA, el usuario puede hacer uso del sistema experto. El sistema experto se diseña con el fin de dar un acompañamiento en la toma de decisiones del usuario dentro del proceso, esto implica que la base de datos del SE, creada a partir de la opinión de expertos y revisión bibliográfica, se manifiesta en cada sugerencia que el usuario reciba.

El sistema experto que NAVA proporciona se puede clasificar, según como se explicó en el capítulo 1, de la siguiente manera:

- **Por la forma de almacenar conocimiento**
El conocimiento se almacena en forma de hechos y reglas.

- **Por la naturaleza de la tarea a realizar**
Diseño, es decir, se busca la construcción de soluciones a las situaciones que se presenten en el proceso de diseño BES, a partir de datos y restricciones conocidas.

- **Por la interacción del usuario**
Apoyo, es decir, el sistema aconseja al usuario, que mantiene la capacidad de una última decisión.
- **Por la limitación de tiempo para tomar decisiones**
Tiempo ilimitado, su análisis no necesita ser inmediato.
- **Por la variabilidad temporal del conocimiento**
Puede ser tanto estático como dinámico; depende si NAVA está aconsejando o advirtiéndolo.
- **Por la naturaleza del conocimiento almacenado**
Basado en experiencia, la base de conocimiento de NAVA se basa en experiencias de expertos, además de una revisión bibliográfica.
- **Por la certeza de la información**
Puede ser tanto completa como imperfecta. Esto depende de la incertidumbre de los datos que el usuario le proporciona al sistema.

3.1 REVISION CONCEPTUAL DEL DISEÑO

- **Metodología Baker Hughes**

La metodología Baker Hughes se emplea en el software AutographPC; esta se puede considerar como la metodología punto de partida. Es decir, al evaluar las demás metodologías se observa que estas parten desde los pasos básicos propuestos por Baker Hughes, pero agregando o modificando ciertos procesos.

- **Metodología Schlumberger ¹⁷**

La metodología Schlumberger se emplea en el software SubPUMP.

¹⁷ SUBPUMP, Análisis y diseño de bombas sumergibles Manual Técnico de referencia. IHS.

Entre las diferencias con respecto a la metodología propuesta por Baker Hughes, se destacó, para tener en cuenta en el proceso final NAVA:

- La introducción del concepto de una columna dinámica en el anular. Esto se explica a partir del hecho que cuando se está en producción, la columna en el anular está en continuo movimiento, no es estática. Se decide diseñar a partir de este concepto, pues la mayor parte del tiempo el sistema BES estará operando.
- Al hacer los cálculos preliminares respectivos, Baker Hughes no tiene en cuenta un gradiente de fricción que actúa como pérdidas en el anular. Esto debido a que Baker Hughes considera la columna en el anular estática; NAVA decide implementar este gradiente de fricción, siguiendo las recomendaciones de Schlumberger.
- Se da la opción de instalar la bomba por debajo del nivel de perforados. Aunque esto generalmente no es recomendable, pues la bomba tendrá más desgaste y se requiere más tubería de instalación; pueden existir casos específicos donde se requiera implementar esto, como por ejemplo para pozos con caudales muy pequeños.

Se resuelve que el usuario tenga la decisión. Esta medida está documentada en el sistema experto.

- Propone el método de los 8 puntos como recurso gráfico para el usuario en la toma de decisiones. Esta curva consiste en ocho puntos de tasas (0-7). El Punto 6 se calcula con el caudal donde el nivel de fluido dinámico en el casing es igual a la profundidad de entrada de la bomba si la bomba está por encima del tope de las perforaciones o igual al tope de las perforaciones si la bomba está por debajo de esta profundidad. También es conocido como el punto “pump off” del pozo.

El punto 7 se calcula donde el nivel de fluido dinámico en el casing es llevado a la profundidad del tope de la perforación para calcular el punto del flujo abierto absoluto del pozo (AOF) en la curva del sistema. El punto 0 en la curva del sistema del pozo se calcula al 1% del caudal del Punto 7. Los puntos 1 al 6 se generan a iguales caudales entre los puntos 0 y 7.

- **Metodología Daniel Bustamante** ¹⁸

Entre las variaciones más destacables del trabajo propuesto por Daniel Bustamante, se decide implementar en NAVA, las correcciones hechas al fluido a trabajar. Estas son correcciones debidas al tipo de emulsión que se presenta y a la viscosidad del fluido que se está bombeando.

3.2 ANÁLISIS CUALITATIVO Y CUANTITATIVO PARA EL SE

La primera sección del Sistema Experto realiza una evaluación cualitativa y cuantitativa de las variables de operación involucradas en el bombeo Electro sumergible.

Esta evaluación tiene lugar implícitamente en el software. A medida que el usuario va introduciendo los datos básicos del diseño, NAVA va calculando datos preliminares; si NAVA observa algún valor fuera de rango o extraño inmediatamente NAVA mostrara una señal de advertencia, explicando el porqué de ella.

Por otro lado, NAVA no solo analiza datos individualmente, sino, como característica de sistema experto, relaciona valores para detectar datos no consistentes entre sí. Por ejemplo, un valor de presión de fondo fluyente de prueba mayor a la presión de yacimiento, un Rs alto junto con una SG alta, un valor de diámetro de tubing mayor

¹⁸ BUSTAMANTE, VILLAMAR, Daniel Adolfo. Metodología para el desarrollo de un programa de cómputo para el diseño de bombeo electrosumergible y su aplicación. Trabajo de grado para optar por el título de ingeniero de Petróleos. Escuela Superior Politécnica del Litoral, Ecuador, 2007.

al valor de diámetro de casing, entre otras. En estos casos, el mensaje alerta también aparecerá en la pantalla.

Los datos básicos para el diseño, y para los cuales NAVA realiza un análisis cualitativo y cuantitativo se pueden resumir en la Tabla 3.

3.3 DISEÑO DEL BOMBEO ELECTROSUMERGIBLE EN EL SE

El diseño de una instalación de bombeo electrosumergible depende de muchas variables, al principio del diseño es necesario realizar una serie de cálculos para establecer las condiciones del fluido, posterior a ello, se seleccionan los diferentes componentes del sistema. A continuación, se presenta una guía para la construcción y el diseño BES soportada bajo el sistema experto.

Los Sistemas Expertos como se comentó en el Capítulo 1, se basan en la consideración de experiencias ocurridas en el pasado o experiencias aprendidas, este SE no es la excepción y toma en cuenta las experiencias técnicas de los ingenieros de producción y prácticas de aplicación de campo del personal técnico especialista del área, con el fin de facilitar el diseño de un sistema de levantamiento artificial por bombeo electrosumergible, calculando los parámetros de operación más importantes del sistema BES.

Al igual que pasa con la tecnología, el SE tendrá que ir actualizándose, creciendo y mejorando, por lo cual se recomienda que en futuras versiones se complemente el diseño y seguimiento del sistema BES; cabe señalar, que un SE en ningún momento podrá remplazar a un Ingeniero especialista, porque es este el que alimenta el conocimiento y lecciones aprendidas al SE, simplemente será una herramienta útil que ayude en la toma de decisiones rápidas¹⁹.

¹⁹ SÁNCHEZ ROMERO, Filiberto. Diseño de un sistema experto para la aplicación del bombeo mecánico intermitente en pozos productores de aceite, Trabajo de grado presentado para optar por el título de Maestro en Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, México, 2014.

Tabla 3. Datos básicos diseño de un SLA por bombeo electrosumergible

DATOS BÁSICOS				
DATOS DEL POZO	DATOS DE PRODUCCION	CONDICIONES DE FLUIDO DEL POZO	FUENTES DE ENERGÍA	POSIBLES PROBLEMAS
Tamaño y peso del casing	Presión del tubing en la cabeza del pozo	Gravedad específica del agua	Voltaje primario disponible	Arena
Profundidad de asentamiento del casing	Presión en el casing en la cabeza del pozo	Gravedad específica o API del petróleo	Frecuencia	Carbonatos
Tamaño, tipo y conexión del tubing	Nivel de producción de ensayo del pozo	Gravedad específica del gas	Capacidad de la fuente de potencia	Corrosión
Intervalo de perforaciones del pozo, con disparos o abiertos	Nivel de fluido y/o presión de fondo fluyente	Viscosidad del crudo		Parafina
Profundidad de asentamiento de la bomba	Nivel de fluido estático y/o presión estática de fondo de pozo	Datos PVT		Emulsión
	Profundidad de referencia			Gas
	Temperatura de fondo de pozo			Alta temperatura
	Caudal de flujo deseado			
	Relación Gas-Petróleo (GOR y Rs)			
	Presión del punto de burbuja			
	Corte de agua			

Fuente: Baker Hughes – Artificial Lift System
Elaborado por: Autores

3.3.1 Información básica requerida

La selección de una unidad de Bombeo Electrosumergible, no es una tarea difícil, especialmente si los datos son confiables. Pero si la información es pobre, el diseño generalmente será marginal. Los datos erróneos frecuentemente traen como resultado una bomba mal diseñada y una operación costosa. En la Tabla 3, se detallan un sin número de datos requeridos para el buen diseño de un sistema de levantamiento artificial por bombeo electrosumergible.

3.3.2 Capacidad de Producción

Determinar la productividad del pozo a la profundidad a la que se desea instalar la bomba o determinar la profundidad de instalación de la bomba a la tasa de producción deseada.

Predecir el comportamiento del pozo es una tarea difícil y compleja, pero es probablemente uno de los pasos más importantes en el diseño de un sistema de Bombeo Electrosumergible. El conocimiento de la presión de flujo en el fondo del pozo (P_{wf}) con el correspondiente caudal de producción (Q) es la mínima información necesaria. Resulta conveniente encontrar una relación entre el flujo de líquidos en el pozo y la fuerza causada por la diferencia entre la presión promedio del yacimiento (P_r) y la presión de flujo en el fondo del pozo (P_{wf}), esta es la relación del comportamiento de afluencia o capacidad de producción (IPR).

Diferentes factores como daños ocasionados a la formación de producción del pozo (efecto "skin"), las fluctuaciones de las presiones del yacimiento, los cambios en la composición y en las propiedades del fluido, etc. afectan la capacidad de producción del pozo. Si todas estas variables pudieran ser calculadas, las ecuaciones resultantes de la integración de la ecuación de Darcy, podrían ser usadas para calcular el IPR del pozo. Desafortunadamente este tipo de información por lo

general no está disponible, por lo tanto, métodos empíricos se han desarrollado para calcular el caudal del pozo.

Para calcular la capacidad de producción se puede utilizar el método del Índice de Productividad (IP o J) en yacimientos en los cuales la presión de flujo es mayor o igual a la presión de burbuja ($P_{wf} \geq P_b$). El método de Vogel se debe emplear si la presión de fondo es menor que la presión de burbuja ($P_{wf} < P_b$), condiciones en las cuales se genera un flujo bifásico por lo cual no se puede usar correctamente la relación lineal IP.

- **Curva de Capacidad de producción (IPR)** ²⁰

- **Índice de productividad (IP)**

El Índice de Productividad es la relación que existe entre la tasa de producción en barriles por día y la diferencia de presión “drawdown” en el fondo del pozo ($P_r - P_{wf}$). El Índice de Productividad (IP) es una medida del potencial del pozo o de su capacidad de producir.

$$IP = \frac{Q}{(P_r - P_{wf})}$$

Ecuación 2

Para determinar la curva de comportamiento de afluencia del pozo IPR, se puede determinar mediante la ecuación 2. Esta es la forma más simple de construir la curva de la relación del comportamiento de afluencia (IPR), la cual resulta de la suposición de que el IPR es una relación lineal.

La constante de proporcionalidad que mide la productividad del pozo se le conoce como el Índice de Productividad (IP). Esto es válido cuando la presión de fondo

²⁰ AGUILAR APOLO. Op. cit., p. 19, 37, 38.

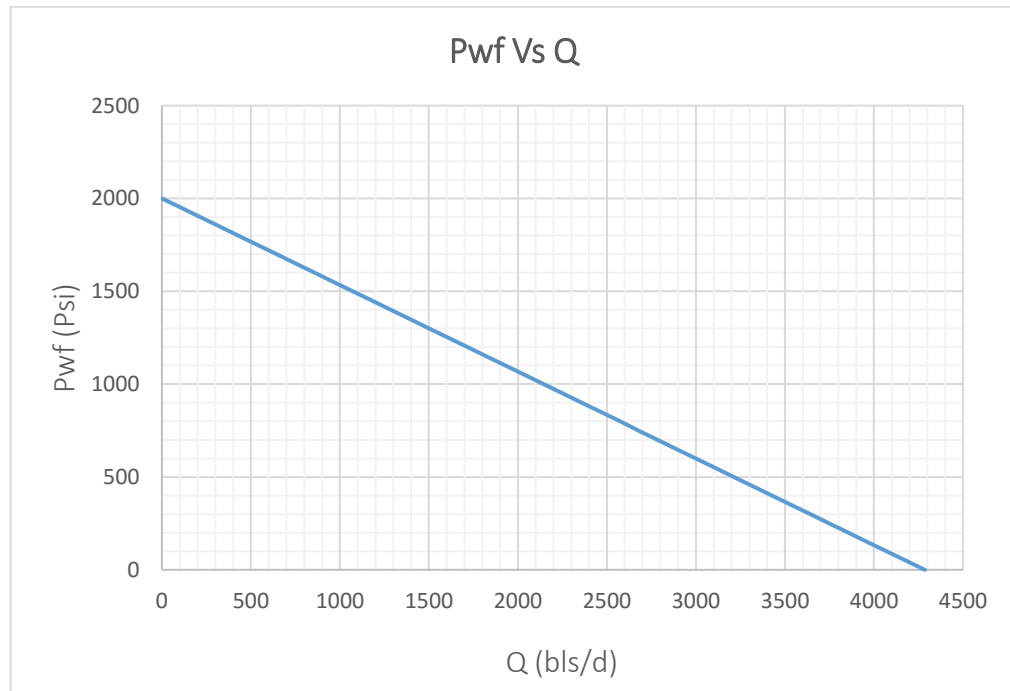
fluyente (P_{wf}) es mayor que la presión de burbuja (P_b), es decir, cuando el flujo del fluido es similar al flujo de una fase. Asumiendo un Índice de Productividad constante, podemos transformar la Ecuación 2 para resolver nuevas tasas de producción (Q) en base a nuevas presiones de flujo (P_{wf}), y así construir la curva de IPR:

$$Q = IP * (P_r - P_{wf})$$

Ecuación 3

La Figura 15, esquematiza el comportamiento del pozo, cuando se asume un índice de productividad constante.

Figura 15. Curva de IPR (índice de productividad constante)



Cuando la presión del pozo cae por debajo de la presión del punto de burbuja, el gas sale de solución e interfiere con el flujo de petróleo y del agua. El caudal del pozo empieza a declinar a mayores reducciones de presión. Este caso se presenta en la mayoría de pozos en levantamiento artificial en los cuales existe un flujo

bifásico. Cuando un pozo se encuentra en estas condiciones de flujo no es correcto asumir un índice de productividad constante, para la construcción de la curva de IPR, por lo tanto, se utiliza el Método de Vogel.

➤ **Método de Vogel**

Vogel desarrolló un modelo matemático para calcular el IPR de un yacimiento con empuje de gas disuelto, el resultado de su estudio es una curva de referencia sin dimensiones que se ha convertido en una herramienta efectiva en la definición del comportamiento de afluencia del pozo. La ecuación empírica desarrollada por Vogel se la expresa de la siguiente manera.

$$\frac{Q}{Q_{\text{máx.}}} = 1 - 0.2 * \left(\frac{P_{\text{wfl}}}{P_r}\right) - 0.8 * \left(\frac{P_{\text{wfl}}}{P_r}\right)^2$$

Ecuación 4

El índice de productividad se puede calcular usando una versión modificada de la ecuación de Vogel, para yacimientos en los cuales la presión de prueba se encuentra por debajo de la presión del punto de burbuja.

$$IP = \frac{Q}{P_r - P_b + \left(\frac{P_b}{1.8}\right) * \left[1 - 0.2 * \left(\frac{P_{\text{wfl}}}{P_b}\right) - 0.8 * \left(\frac{P_{\text{wfl}}}{P_b}\right)^2\right]}$$

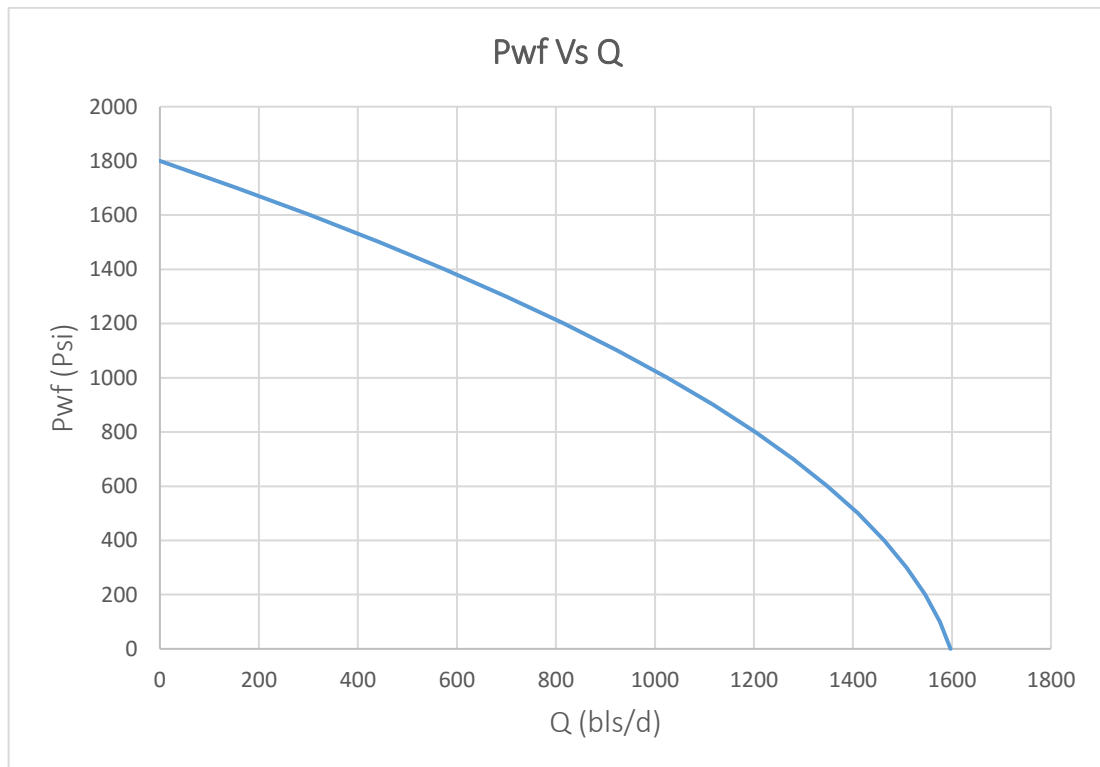
Ecuación 5

Para calcular cualquier caudal de flujo mayor al caudal en el punto de burbuja (Q_b), donde P_{wf} < P_b, la ecuación de Vogel se puede expresar como se muestra en la Ecuación 6, ilustrada en la Figura 16.

$$Q = Q_b + \frac{IP * P_b}{1.8} * \left[1 - 0.2 * \left(\frac{P_{\text{wfl}}}{P_r}\right) - 0.8 * \left(\frac{P_{\text{wfl}}}{P_r}\right)^2\right]$$

Ecuación 6

Figura 16. Curva IPR, método de Vogel



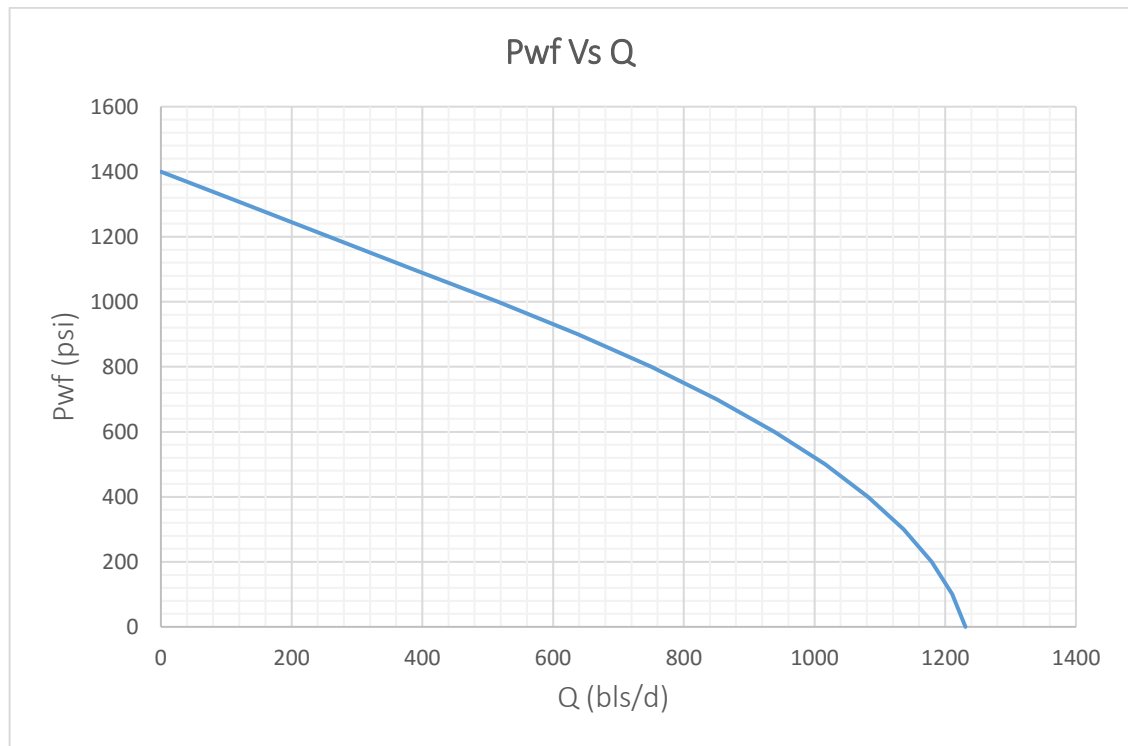
➤ IPR Compuesto

El IPR compuesto, es una combinación de índices de productividad. Se basa en utilizar el índice de productividad constante cuando las presiones de reservorio están por encima de la presión del punto de burbuja, y cuando la presión está por debajo de esta, se utiliza el IPR de Vogel.

Este IPR está particularmente utilizado cuando la presión de reservorio (P_r), está por encima de la presión de burbuja (P_b) y la presión dinámica de fondo fluente está por debajo (P_{wf}).

Para la construcción de la curva de IPR, mediante este método se utilizan las ecuaciones descritas en los métodos anteriores (IP Constante y Vogel). En la Figura 17, se ilustra la construcción de la curva de IPR, mediante este método.

Figura 17. Curva IPR, método del IPR compuesto



3.3.3 Cálculos Preliminares ²¹

En Diseños de alto GOR, y si la relación gas/aceite en solución (R_s), el factor de volumen del gas (B_g), y el factor de volumen de formación (B_o) no están disponibles con los datos del yacimiento, deben ser calculados. Las correlaciones más comunes a partir de las cuales se puede obtener la relación gas/aceite en solución (R_s) y los factores de volumen de formación (B_g) y (B_o) son:

1. Standings
2. Vázquez y Beggs
3. Lasater
4. Glaso
5. Kartoadmodjo

²¹ *Ibíd.*, p. 62.

La correlación que se seleccione afectará definitivamente al diseño, por lo que se debe seleccionar la que mejor se ajuste a las condiciones reales. Las siguientes son las correlaciones de Standings para la relación gas/aceite en solución y los factores de volumen de formación:

- **Correlaciones de Standings**

- **Relación de Solubilidad**

$$R_s = \gamma_g * \left(\frac{P_b}{18} * \frac{10^{0.0125 * \text{API}}}{10^{0.00091 * T}} \right)$$

Ecuación 7

- **Factor Volumétrico de Formación del Aceite**

$$B_o = (0.972 + 0.000147 * F^{1.175})$$

Ecuación 8

$$F = R_s * \left(\frac{\gamma_g}{\gamma_o} \right)^{0.5} + 1.25 * T$$

Ecuación 9

- **Factor volumétrico de formación del Gas**

$$B_g = 5.04 * \left(\frac{Z * T}{P} \right)$$

Ecuación 10

3.3.4 Condiciones de Asentamiento de la Bomba

Al momento de elegir las condiciones óptimas de asentamiento de la bomba se requiere tener en cuenta ciertos criterios tales como: caudales a manejar de agua,

crudo y gas, pérdidas por fricción a través de la tubería y nivel de fluido, estático o dinámico.

Baker y Daniel Bustamante proponen los cálculos de asentamiento de la bomba asumiendo condiciones estáticas para el nivel del fluido, por otro lado, Schlumberger tiene en cuenta una columna de fluido dinámica. Para la realización de estos cálculos de asentamiento se utiliza lo propuesto por Schlumberger. En primera instancia es necesario conocer los caudales que se desean extraer, para esto se utilizan las siguientes ecuaciones.

- Caudal de Aceite en Superficie

$$Q'_o = Q'_t * (1 - BSW)$$

Ecuación 11

- Caudal de Aceite en Yacimiento

$$Q_o = Q'_o * B_o$$

Ecuación 12

- Caudal de Agua en Superficie

$$Q'_w = Q_w$$

Ecuación 13

- Caudal de Agua en Yacimiento

$$Q_w = Q'_t * BSW$$

Ecuación 14

- Caudal de Gas en Superficie

$$Q'_g = \frac{(GOR - R_s)}{5.615} * Q'_o$$

Ecuación 15

- Caudal de Gas en Yacimiento

$$Q_g = Q'_g * B_g$$

Ecuación 16

- Caudal de Fluido (Aceite y Agua) en Yacimiento

$$Q_t = (Q_o' * B_o) + Q_w$$

Ecuación 17

- **Pérdidas por fricción en la tubería de producción**

La fricción en la tubería variará con el tamaño, longitud y capacidad de la misma, y además con la viscosidad del fluido.

En la Ecuación 18, se observa la Fórmula de Hazen - Williams para calcular la pérdida por fricción en la tubería:

$$F_r = 2.083 * \left(\frac{100}{C}\right)^{1.85} * \left(\frac{Q_o}{C}\right)^{1.85} * \frac{1}{ID_{csg}^{4.8655}}$$

Ecuación 18

$$F_{rr} = \frac{F_r}{1000} * 0.433$$

Ecuación 19

Schlumberger también propone el uso de un gradiente por pérdidas de fricción con el fin de cuantificar la cantidad de pérdidas en psi de gas, aceite y fluido por pie.

- Gas

$$n_g = \frac{\rho_g}{62.4} * (0.433 + F_{rrg})$$

Ecuación 20

- Aceite

$$n_o = \gamma_o * (0.433 + F_{rro})$$

Ecuación 21

- Fluido

$$n_{fl} = \gamma_{fl} * (0.433 + F_{rrfl})$$

Ecuación 22

○ **Condiciones Dinámicas**

Como se mencionó anteriormente se asumen condiciones dinámicas del nivel de fluido dentro de la tubería, para lo cual, es necesario conocer el caudal y la gravedad específica del fluido que se definen como:

$$Q_N = (Q_o' * B_o) + Q_w + Q_g$$

Ecuación 23

$$\gamma_{fl} = X_w + (X_o * \gamma_o) + \left(X_g * \frac{\rho_g}{62.4} \right)$$

Ecuación 24

➤ **Fracción de Gas, Aceite y Agua en la Columna Total de Fluido** ²²

En condiciones de producción estabilizadas, el crudo en el anular del casing se satura con el gas que fluye continuamente a la superficie. Consecuentemente, si se ventea el gas en superficie a una tasa constante, el gas libre se produce desde la formación simultáneamente con el crudo. Generalmente, la mayor parte del crudo se produce a través de la bomba mientras que la mayor parte del gas libre se produce en el anular del casing.

Podio sugiere un método para determinar la Pwf cuando exista una columna líquida gaseosa en el anular; él incluye un término definido como la fracción de crudo efectiva.

²² SUBPUMP. Op. cit., p. 56.

Es posible correlacionar directamente el caudal de gas en el anular y el área del anular con la fracción dinámica de gas en la columna de fluido (X_g) y con la fracción de crudo específica. Después de conocida la columna líquida gaseosa (X_g), se hace sencillo conocer las otras 2 fracciones de los fluidos.

$$1 - X_g = X_w + X_o$$

Ecuación 25

- Fracción de Aceite

$$X_o = \left[\frac{Q_o' * B_o}{Q_t} \right] * (1 - X_g)$$

Ecuación 26

- Fracción de Agua

$$X_w = \left[\frac{Q_w}{Q_t} \right] * (1 - X_g)$$

Ecuación 27

Luego de obtener los cálculos analizados anteriormente se puede obtener la profundidad y sumergencia de la bomba, para esto se proponen dos formas:

a. Conociendo Caudal total (Q_t) y Presión de entrada a la bomba (PIP) ²³

Por medio de la Ecuación 28 es posible calcular la profundidad de la bomba.

$$TVD_p = TVD_{perf. tope} - \frac{(P_{wfd} - PIP)}{\rho_{fl}}$$

Ecuación 28

Sumergencia de la bomba

Schlumberger hace énfasis en el asentamiento de la bomba, proponiendo que ésta puede estar ubicada por encima o por debajo de la zona perforada.

²³ AGUILAR APOLO. Op. cit., p. 19, 37, 38, 62, 66.

- Bomba por encima de los perforados

La Ecuación 29 es utilizada para calcular la sumergencia de la bomba.

$$FOP = - \left[\frac{PIP - P_{csg} - (TVD_p * n_o)}{n_g - n_o} - TVD_p \right]$$

Ecuación 29

- Bomba por debajo de los perforados

La sumergencia de la bomba se calcula con la Ecuación 30.

$$FOP = - \left[\frac{P_{wfd} - P_{csg} - (TVD_{perf. tope} * n_o)}{n_g - n_o} - TVD_p \right]$$

Ecuación 30

b. Conociendo Caudal total (Qt) y Profundidad de la Bomba (TVDp).

Con las Ecuaciones 31 y 32 se calcula la Presión de entrada a la bomba.

$$\Delta P = [TVD_{perf. tope} - TVD_p] * n_{fl}$$

Ecuación 31

$$PIP = P_{wfd} - \Delta P$$

Ecuación 32

Sumergencia de la bomba

- Bomba por encima de los perforados

La Ecuación 33 se usa para calcular la sumergencia de la bomba.

$$FOP = - \left[\frac{PIP - P_{csg} - (TVD_p * n_o)}{n_g - n_o} - TVD_p \right]$$

Ecuación 33

- Bomba por debajo de los perforados

Mediante la Ecuación 34 se puede realizar el cálculo de la sumergencia de la bomba.

$$FOP = - \left[\frac{P_{wfd} - P_{csg} - (TVD_{perf. tope} * n_o)}{n_g - n_o} - TVD_p \right]$$

Ecuación 34

3.3.4.1 Acompañamiento del SE en la decisión sobre los parámetros a utilizar

Los problemas operacionales con mayor frecuencia del sistema BES son²⁴:

- Por taponamiento debido a arenas, parafinas, como también por corrosión interna del equipo, las cuales limitan la rotación de las bombas.
- Por problemas mecánicos como los ejes sueltos de bombas, separadores, etc.
- Por problemas eléctricos como equipos circuitados (motores, cable).
- Por problemas del yacimiento, como bajo aporte del pozo, alto BSW.
- Otra limitación es el diferencial de temperatura, cuando el motor se recalienta, sus componentes se expanden a velocidades diferentes debido a que los materiales no son iguales.

Teniendo en cuenta los problemas anteriormente mencionados, se estudian a continuación los parámetros que más afectan al sistema BES como son el

²⁴ BUSTAMANTE VILLAMAR. Op. cit., p. 58.

arenamiento, puesto que, la arena es una de las principales causantes de fallas en la bomba y la conificación por agua y/o gas, debido a la disminución en el aporte del pozo.

- **Arenamiento** ²⁵

Una de las formas de reducir el arenamiento es producir a tasas de producción inferiores a la tasa crítica de desestabilización de los granos. Esta tasa máxima se puede relacionar con el índice de productividad del yacimiento y obtener la caída de presión máxima permisible.

De igual forma, si se conoce el índice de productividad del yacimiento y se calcula la máxima caída de presión permisible (MCPP) teniendo como referencia una condición de no arenamiento, se puede obtener la tasa de producción crítica arriba de la cual se presentará el arenamiento.

- MCPP utilizando el criterio de Mohr-Coulomb

Según lo formulado por la teoría de mecánica de rocas para condición de falla y teniendo en cuenta la resistencia inicial se puede calcular la MCPP con la Ecuación 34.

$$(MCPP)_{MC} = \nabla P_p * (1 - \alpha) * D - (C - R_{MC})$$

Ecuación 34

$$C = \frac{\mu}{1 - \mu} * [(\nabla P_{ov} - \alpha) * \nabla P_p] * D$$

Ecuación 35

²⁵ COLMENARES DÍAZ, Luis Carlos. ORTEGA RUEDA, Freddy Augusto. Modelo para determinar las posibles causas del arenamiento de los pozos productores de petróleo con base en la hipótesis de Griffith/Mohr-Coulomb. Trabajo de grado presentado para optar por el título de Ingeniero en Petróleos, Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, 1992.

$$R_{MC} = (L_i * \text{Cos}\beta) + (C * \text{Sen}\beta)$$

Ecuación 36

- MCPP utilizando el criterio de Griffith

EL MCPP se puede calcular además teniendo en cuenta el criterio de falla de Griffith como se muestra en la Ecuación 37.

$$(\text{MCPP})_G = \nabla P_p * (1 - \alpha) * D - (C - (4 * C))$$

Ecuación 37

- **Conificación por agua y/o gas** ²⁶

Diferentes investigadores han estudiado el fenómeno de la conificación y cada uno de ellos ha presentado sus resultados en forma de correlaciones. En general todos los autores parten de un mismo conjunto de suposiciones las cuales se presentan a continuación:

- ✓ El yacimiento es homogéneo y completamente horizontal.
- ✓ Una sola zona se encuentra abierta a producción.
- ✓ No hay interferencia de otros pozos ni barreras de flujo.
- ✓ El área de drenaje para un pozo vertical se considera circular.
- ✓ Las propiedades de los fluidos permanecen constantes durante toda la vida productiva del pozo.

²⁶ ACOSTA MIRELA, María Carolina. Programa computarizado para el cálculo de la tasa crítica por conificación de agua y/o gas. Trabajo de grado presentado para optar por el título de Magíster en ingeniería de Petróleos, Universidad de Zulia, Maracaibo, 2005.

- ✓ Para el caso de producción de aceite la presión del yacimiento se mantiene por encima de la presión de burbuja.

➤ Craft & Hawkins

Predice la tasa crítica para un pozo que penetra parcialmente la zona productora.

$$Q_{Oc} = \frac{3.0656 * 10^{-3} * k_H * H_o * (\rho_w - \rho_o) * (H_o - H_p - H_{aP})}{\mu_o * B_o * \ln\left(\frac{r_e}{r_w}\right)} * PR$$

Ecuación 38

$$PR = \left(\frac{H_p}{H_o}\right) * \left[1 + 7 * \left(\frac{r_w}{2 * H_p}\right)^{\frac{1}{2}} * \text{Cos}\left(90 * \frac{H_p}{H_o}\right)\right]$$

Ecuación 39

➤ Mayer, Gardner & Pirson

Predice la tasa crítica para la conificación de gas, agua y ambos para pozos de flujo netamente radiales.

- Conificación del gas

$$Q_{Oc} = 0.001535 * \frac{k_H * (\rho_o - \rho_G) * (H_o^2 - (H_o - H_p)^2)}{\mu_o * B_o * \ln\left(\frac{r_e}{r_w}\right)}$$

Ecuación 40

- Conificación del agua

$$Q_{Oc} = 0.001535 * \frac{k_H * (\rho_w - \rho_o) * (H_o^2 - H_p^2)}{\mu_o * B_o * \ln\left(\frac{r_e}{r_w}\right)}$$

Ecuación 41

- Conificación simultánea

$$Q_{Oc} = 0.001535 * \frac{k_H * (H_o^2 - H_P^2)}{\mu_o * B_o * \ln\left(\frac{r_e}{r_w}\right)} * \left[(\rho_w - \rho_o) * \left(\frac{\rho_o - \rho_G}{\rho_w - \rho_G}\right)^2 + (\rho_o - \rho_G) * \left(1 - \frac{\rho_o - \rho_G}{\rho_w - \rho_G}\right)^2 \right]$$

Ecuación 42

- Schols

Predice la tasa crítica en un pozo vertical para una zona productora continua con presencia de un acuífero.

$$Q_{Oc} = \frac{k_H * (\rho_w - \rho_o) * (H_o^2 - H_P^2)}{2049 * \mu_o * B_o} * \left[0.432 + \frac{3.1416}{\ln\left(\frac{r_e}{r_w}\right)} \right] * \left[\frac{H_o}{r_e} \right]^{0.14}$$

Ecuación 43

- **Presión de Entrada a la Bomba**

El gas libre que entra en la bomba puede tomar una de dos posibles trayectorias, puede volver a la solución al aumentar presión en cada etapa o comprimirse como gas libre.

El gas libre se comportará entre estos dos escenarios, pero se cree que en su mayoría el gas permanecerá comprimido en lugar de volver a la solución, principalmente debido a la alta velocidad y turbulencia a la que está sujeto el fluido y al corto periodo de tiempo que el fluido permanece en la bomba.

El hecho que el gas permanezca comprimido produce problemas como cavitación y taponamiento en la bomba; por tal motivo se considera apropiado establecer la PIP de 100 a 200 psi mayor a la Presión de burbuja del fluido a bombear.

- **Profundidad de la Bomba**

Se recomienda colocar la bomba arriba de los perforados con el fin de evitar un gasto innecesario de cable, además la experiencia ha mostrado que éste acto conlleva un aumento en el caballaje requerido por la bomba generando costos adicionales.

Se recomienda el asentamiento de la bomba por encima de la zona cañoneada mínimo 100 ft evitando contacto directo con los fluidos provenientes de la formación y respetando una sumergencia entre 300 - 400 ft para garantizar así el buen funcionamiento de la bomba centrífuga.

3.3.5 Cálculos estáticos para el Gas ²⁷

La presencia de gas libre en la entrada de la bomba y en la tubería de producción hace que el proceso de selección del equipo sea más complicado y voluminoso. Como el fluido (mezcla de líquido y gas) fluye a través de las etapas de la bomba desde la entrada hasta la descarga y a través de la tubería de producción, la presión y, en consecuencia, las propiedades del fluido (como volumen, densidad, etc.) van cambiando continuamente.

El desempeño de una bomba centrífuga también se ve considerablemente afectado por el gas. En la medida en que el gas permanezca en solución, la bomba se comporta normalmente como si estuviera bombeando un líquido de baja densidad.

Sin embargo, la bomba comienza a producir una cabeza menor de lo normal a medida que la relación gas a líquido (en condiciones de bombeo) aumenta hacia un cierto valor “crítico” (normalmente alrededor del 10-15%).

²⁷ AGUILAR APOLO. Op. cit., p. 19, 37, 38, 62, 66, 71.

A continuación, se muestran los cálculos de los caudales de gas, crudo, agua y el % gas en la bomba respectivamente; dichos cálculos se realizan teniendo en cuenta un estado estático.

- Gas libre

$$\text{Gas Libre} = Q_g$$

Ecuación 44

- Aceite

$$Q_o = Q'_o * B_o$$

Ecuación 45

- Agua

$$Q_w = Q'_t - Q'_o$$

Ecuación 46

- Porcentaje de Gas

$$\% \text{ Gas} = \frac{Q_g}{Q_w + Q_g + Q_o}$$

Ecuación 47

3.3.5.1 Acompañamiento del SE en la decisión sobre los cálculos del gas y la elección del separador ²⁸

- **Separación Natural**

La separación natural del gas en el anular es una parte del proceso general de separación de gas de fondo. Puede ser afectada por muchos factores, tales como

²⁸ SUBPUMP. Op. cit., p. 56,70.

área anular, caudal y propiedades del fluido. Aunque existen pocos modelos de procesos de separación natural de gas, ninguno de ellos es perfecto.

El modelo simplificado de Alhanati se incluye como una opción para proveer un estimado aproximado de la eficiencia de la separación natural de gas. Hay dos suposiciones en el modelo de Alhanati simplificado. Primero, se asume que existe una fracción vacía uniforme dentro de la región que rodea la sección del motor hasta los puertos de salida del gas. Segundo, no existe condición de deslizamiento entre las fases de gas y líquido para la región frente al puerto de entrada del separador de gas.

Basado en las suposiciones anteriores, la eficiencia de la separación natural de gas se obtiene a partir de la siguiente ecuación:

$$E = \frac{V_{\infty}}{V_{\infty} + V_{SL}}$$

Ecuación 48

La velocidad superficial de la fase líquida y la velocidad de elevación final de burbujeo se obtienen usando las Ecuaciones 49 y 50.

$$V_{SL} = \frac{Q_t}{\frac{\pi}{4} * (ID_{csg}^2 - OD_{tbg}^2)}$$

Ecuación 49

$$V_{\infty} = \sqrt{2} * \left[\frac{\sigma * (\rho_L - \rho_g) * g}{\rho_L^2} \right]^{0.2}$$

Ecuación 50

Donde la gravedad, densidad del gas y densidad del líquido se definen como:

$$g = 32.15$$

Ecuación 51

$$\rho_g = \frac{2.7 * P * \gamma_g}{Z * T}$$

Ecuación 52

$$\rho_L = \gamma_L * 62.4$$

Ecuación 53

- **Separación Natural + Separador**

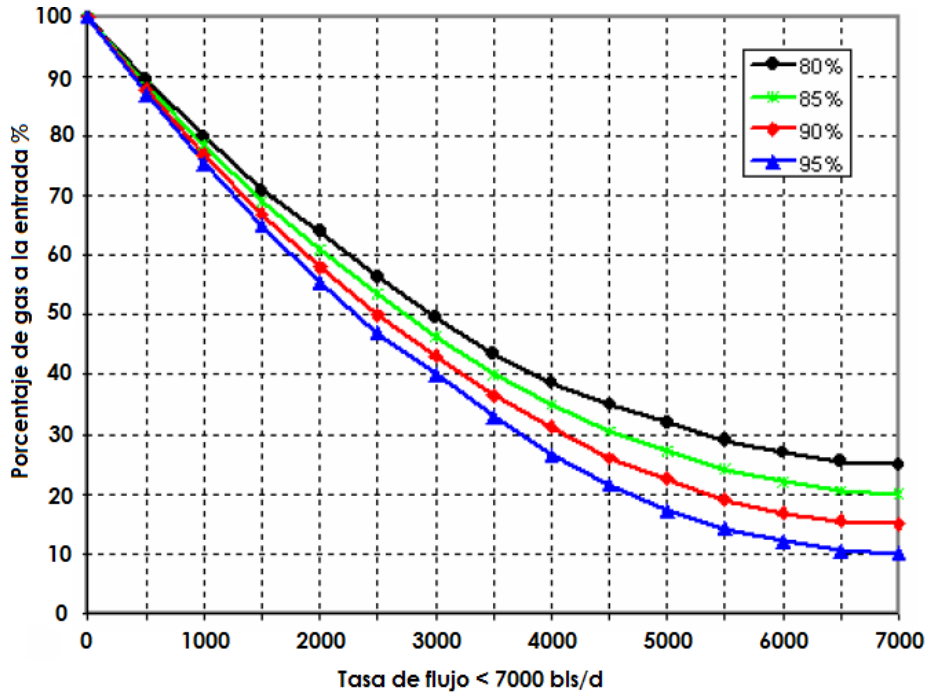
Hay algunos lineamientos para la aplicación de separadores de gas, pero todos tienen sus limitaciones. Más aún, diferentes separadores de gas tienen distinto rendimiento de separación de gas. Por lo tanto, es muy recomendable obtener información sobre la eficiencia del separador por parte del fabricante.

A continuación, se muestran dos gráficos de comportamiento para el separador de gas rotativo, éstas gráficas fueron generadas por el Dr. Lee basado en sus pruebas usando agua y aire como fluidos de prueba.

En cada curva, se lee la eficiencia interceptando la tasa total de líquido en el eje X, con el porcentaje de gas libre a la entrada de la bomba en el eje Y.

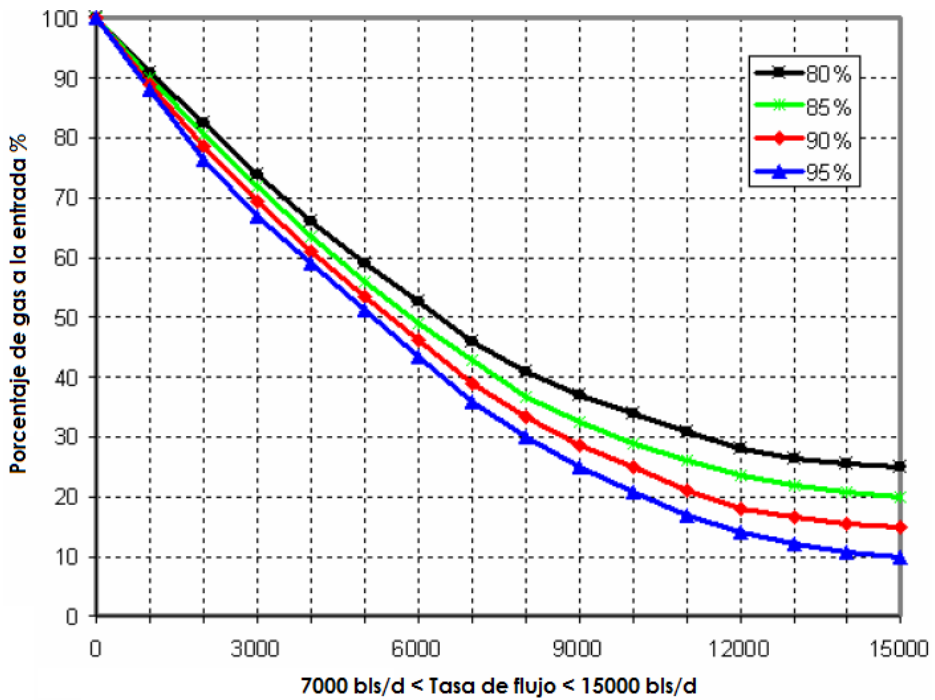
Estas curvas de comportamiento permiten una estimación de la Eficiencia Total de Separación, tanto natural como por separador, en función del Caudal Líquido en la entrada. Pueden no adaptarse a un separador, por lo que deben ser usadas con cautela.

Figura 18. Eficiencia de la Separación de Gas para tasa de flujo < 7000 bls/d.



Fuente: SUBPUMP, Análisis y diseño de bombas sumergibles Manual Técnico de referencia.

Figura 19. Eficiencia de la Separación de Gas para tasa de flujo > 7000 bls/d.



Fuente: SUBPUMP, Análisis y diseño de bombas sumergibles Manual Técnico de referencia.

3.3.6 Selección de la Bomba

Para determinar la bomba que se va a usar es necesario conocer el caudal de fluido que se desea producir, para ello, se calculan a continuación los caudales de gas, agua y aceite.

- Caudal Gas

$$\text{Gas Libre} = (1 - \text{eficiencia}) * Q_g = Q_{gg}$$

Ecuación 54

- Caudal Agua

$$Q_{ww} = Q_w$$

Ecuación 55

- Caudal Aceite

$$Q_{oo} = Q_o$$

Ecuación 56

Además, se hace indispensable conocer la gravedad específica de dicho fluido, para lo cual se determinan las fracciones de gas, agua, aceite y la respectiva gravedad específica mencionada.

$$X_g^{\circ} = \frac{Q_{gg}}{Q_{oo} + Q_{ww} + Q_{gg}}$$

Ecuación 57

$$X_w^{\circ} = \frac{Q_{ww}}{Q_{oo} + Q_{ww} + Q_{gg}}$$

Ecuación 58

$$X_o^\circ = \frac{Q_{oo}}{Q_{oo} + Q_{ww} + Q_{gg}}$$

Ecuación 59

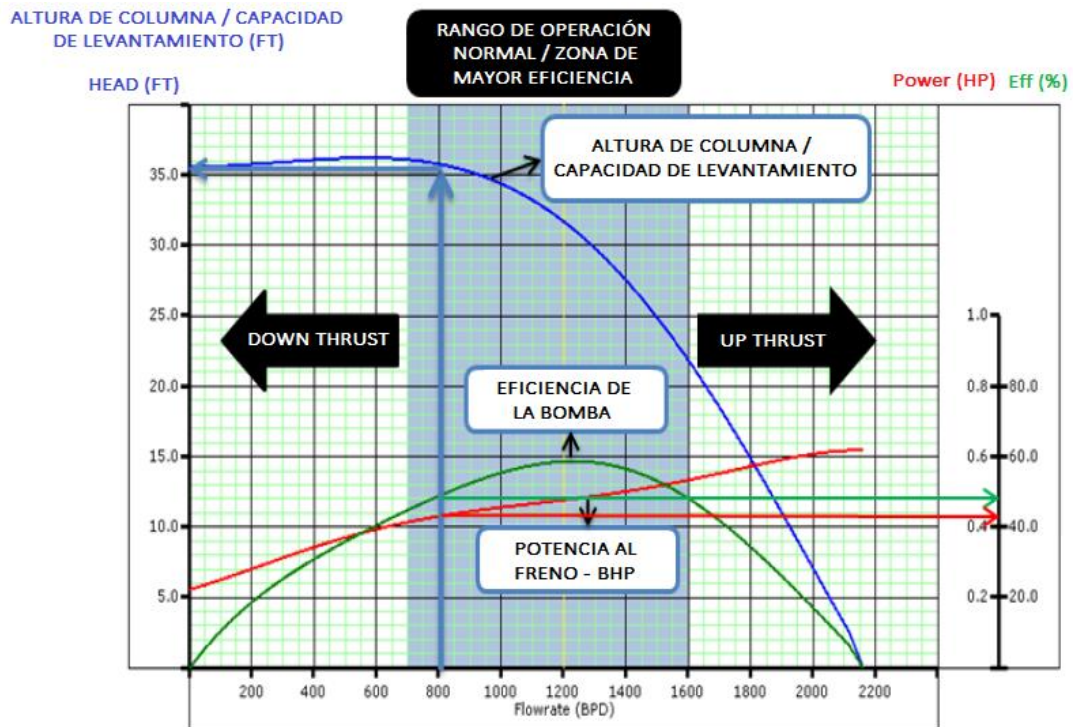
$$\gamma_{fl \text{ bombear}} = (X_g^\circ * \gamma_g) + (X_o^\circ * \gamma_o) + X_w^\circ$$

Ecuación 60

o Dimensionamiento de la Bomba

Para dimensionar la bomba se debe recurrir a la curva característica de desempeño del tipo de bomba seleccionada y determinar el número de etapas requeridas para producir la capacidad anticipada frente a la altura dinámica total calculada previamente. Se debe considerar que las curvas características de las bombas disponibles en los catálogos, son curvas de desempeño para una sola etapa con base en agua con gravedad específica de 1.00 (Figura 20).

Figura 20. Curva característica de desempeño de una bomba centrífuga.



Fuente: Baker Hughes – Artificial Lift System

Para el cálculo del número de etapas de la bomba se debe intersectar la tasa de producción deseada (escala horizontal), con la curva de capacidad de altura de columna/ capacidad de levantamiento y leer este valor en la escala izquierda.

Obteniendo así la capacidad de levantamiento por etapa. Luego dividir la altura dinámica total por el valor determinado (capacidad de levantamiento por etapa) para determinar el número de etapas.

$$\# \text{ de Etapas} = \frac{\text{TDH}}{\text{Capacidad de levantamiento por etapa}}$$

Ecuación 61

○ **Potencia de la Bomba**

La potencia demandada y generada por la bomba puede ser calculada por medio de las Ecuaciones 61 y 62.

$$\text{Potencia demandada por la bomba} = (\text{Potencia motor para la bomba} * n_{\text{motor}})$$

Ecuación 61

$$\text{Potencia generada por la bomba} = \frac{9.8 * Q * \text{TDH}}{n_{\text{bomba}} * 1782708.661}$$

Ecuación 62

3.3.6.1 Acompañamiento del SE en la decisión sobre la elección de la bomba

○ **Bomba**

En la selección de la bomba el principal aspecto a tener en cuenta es el diferencial entre el caudal de trabajo y el caudal de máxima eficiencia, entre más bajo sea el

valor de este diferencial implica que se trabaja lo más cercano posible a la mayor eficiencia.

- **Frecuencia de la Bomba** ²⁹

Para seleccionar la frecuencia de diseño óptima se sugiere realizar pruebas a la bomba, esto bajo las consideraciones establecidas en la norma API 11S2. En caso de no ser posible la realización de las pruebas, se aconseja trabajar la bomba a una frecuencia de 60 Hz; mayores frecuencias implican más costos eléctricos, por otro lado, menores frecuencias conllevan menos caudal y levantamiento. 60 Hz mantiene el equilibrio entre éstas variables.

- **Curva del Sistema del Pozo**

La curva del sistema del pozo se genera en condiciones de superficie (bls) a partir de la diferencia en las cabezas del OUTFLOW y el INFLOW a un caudal dado. Esta curva consiste en nueve puntos de tasas (0-8).

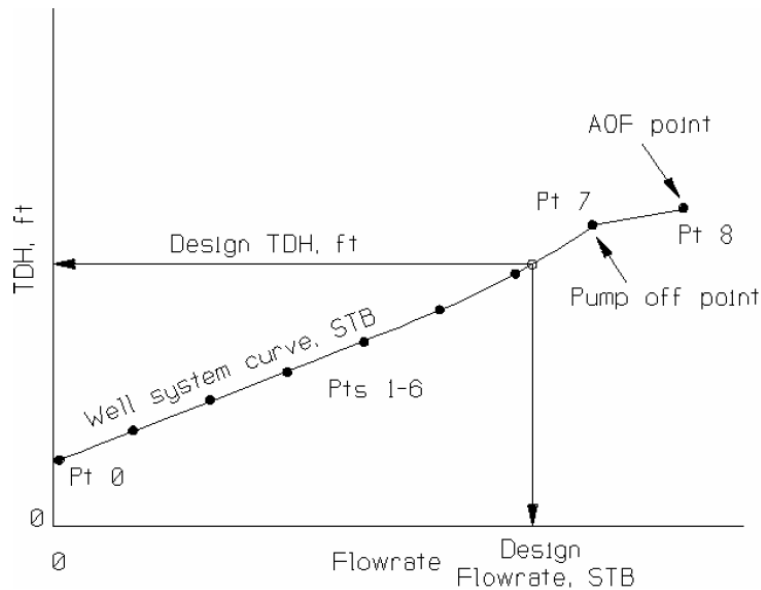
El Punto 7 se calcula con el caudal donde el nivel de fluido dinámico en el casing es igual a la profundidad de entrada de la bomba si la bomba está por encima del tope de las perforaciones o igual al tope de las perforaciones si la bomba está por debajo de está profundidad. También es conocido como el punto “pump off” del pozo.

El punto 8 se calcula donde el nivel de fluido dinámico en el casing es llevado a la profundidad del tope de la perforación para calcular el punto del flujo abierto absoluto del pozo (AOF) en la curva del sistema.

El punto 0 en la curva del sistema del pozo se calcula al 1% del caudal del Punto 7. Los puntos 1 al 6 se generan a iguales caudales entre los puntos 0 y 7.

²⁹ API RP 11S2. Recommended Practice for Electric Submersible Pump testing. Second Edition, October 1997.

Figura 21. TDH del sistema para diferentes caudales de flujo.



Fuente: SUBPUMP, Análisis y diseño de bombas sumergibles Manual Técnico de referencia.

○ **Corrección por Gravedad Específica y Frecuencia** ³⁰

La selección del tipo de Bomba se debe realizar en base a la tasa de producción esperada de fluido y el tamaño del casing, se debe seleccionar el tipo de bomba que estará operando dentro del rango de funcionamiento de la bomba y lo más cercano a su máxima eficiencia, a la tasa de producción esperada. Para la selección del tipo de bomba de acuerdo a la tasa de producción esperada y serie que se adapta a la tubería de revestimiento, se debe recurrir a los catálogos característicos de cada fabricante.

El Procedimiento Práctico Recomendado por el API RP 11S2 con respecto a la prueba y aceptación de las bombas BES establece ciertos criterios para dicha aceptación. Las bombas BES deben estar dentro de $\pm 5\%$ de altura y flujo, estar por debajo de $+8\%$ de los caballos de fuerza al freno y estar dentro del $\pm 10\%$ de eficiencia en su punto de mejor eficiencia.

³⁰ *Ibíd.*, p. 86.

Las bombas centrífugas obedecen, dentro de un amplio rango de velocidades de giro, a una serie de leyes conocidas como Leyes de Afinidad.

$$Q_2 = Q_t * \frac{RPM_2}{RPM_1}$$

Ecuación 63

$$TDH_2 = \frac{TDH_1}{\gamma_{fl \text{ bombear}}} * \left(\frac{RPM_2}{RPM_1}\right)^2$$

Ecuación 64

$$BHP_2 = BHP_1 * \left(\frac{RPM_1}{RPM_2}\right)^3 * \gamma_{fl \text{ bombear}}$$

Ecuación 65

Estas leyes son correctas porque están basadas en la velocidad de rotación. Estas leyes se pueden expresar en términos de frecuencia, si se toma en cuenta que ésta es la que define realmente la velocidad.

○ **Corrección por Viscosidad** ³¹

- Viscosidad absoluta sin gas propuesta por Begs & Robinson's

$$\mu_{abs} = 10^{10[1.6853 - (0.025086 * API) - (0.5644 * \log_{10}(T))]} - 1$$

Ecuación 66

- Viscosidad absoluta corregida por gas en solución

$$A = 10.715 * [R_s + 100]^{-0.515}$$

Ecuación 67

³¹ BUSTAMANTE VILLAMAR. Op. cit., p. 58, 73.

$$B = 5.44 * [R_s + 150]^{-0.33}$$

Ecuación 68

$$\mu'_{abs} = A * \mu_{abs}^B \quad ; \quad [cp]$$

Ecuación 69

- Convertir Viscosidad corregida a Saybolt Second Universal (SSU)

$$V_c = \frac{\mu_{abs}'}{\gamma_{fl \text{ bombear}}}$$

Ecuación 70

$$SSU = \frac{(4.605 + [0.000297 * T]) * V}{1 - 10^{-0.07445 * V^{0.9538}}}$$

Ecuación 71

- Corrección según tipo de emulsión

$$Em_{baja} = [0.9977 - (0.006685 * BSW)]^{\frac{-1}{0.2216}}$$

Ecuación 72

$$Em_{media} = [0.9734 - (0.010333 * BSW)]^{\frac{-1}{0.3926}}$$

Ecuación 73

$$Em_{alta} = [0.9804 - (0.011071 * BSW)]^{\frac{-1}{0.3797}}$$

$$0 \leq BSW \leq 1$$

Ecuación 74

$$SSU' = SSU * Em$$

Ecuación 75

➤ Para $50 < SSU' < 2000$

Finalmente se calcula el caudal de fluido, la altura dinámica total y la potencia de la bomba luego de ser corregidos por el efecto de la viscosidad.

$$Q'_2 = Q_2 * [1.019 - (0.00042 * SSU') + (1.96 * 10^{-7} * SSU'^2) - (4.24 * 10^{-11} * SSU'^3)]$$

Ecuación 76

$$TDH'_2 = TDH_2 * [1.013 - (0.00038 * SSU') + (1.98 * 10^{-7} * SSU'^2) - (4.51 * 10^{-11} * SSU'^3)]$$

Ecuación 77

$$BHP'_2 = BHP_2 * \left[\frac{20,165787 + 1.43787 * SSU^{0.70713}}{25.69021 + SSU^{0.70713}} \right]$$

Ecuación 78

3.3.7 Selección Motor y Sello

○ Dimensionamiento del Motor

Para seleccionar el tamaño del motor adecuado para un tamaño de bomba determinado, se debe conocer los caballos de potencia al freno requerido por la bomba. A la potencia requerida para el manejo de la bomba se le debe añadir la potencia necesaria para el manejo del sello y para el manejo del separador de gas, para así obtener los HP totales que determinan la selección del motor.

● Potencia del Motor

$$BHP_{\text{motor}} = BHP'_2 * \gamma_{\text{fl bombear}} + HP_{\text{sello @ 60Hz}} + HP_{\text{sep. gas @ Hz diseño}}$$

Ecuación 79

Luego se debe seleccionar el voltaje, este voltaje puede seleccionarse en base a las siguientes consideraciones:

$$\text{BHP}_{\text{motor}} = \text{Amperaje} * \text{Voltaje}$$

Ecuación 80

- ✓ Los motores de alto voltaje (consecuentemente baja corriente) causan bajas pérdidas en el cable y requieren cables de pequeño tamaño de conductor.
- ✓ Entre más alto sea el voltaje del motor, más costoso será el controlador del motor.

Para la selección de los parámetros anteriormente explicados, se debe recurrir a tablas características de los motores elaboradas por los fabricantes.

- **Dimensionamiento de la Sección Sellante** ³²

La selección de la sección sellante, se realiza en gran medida con experiencia de los Ingenieros de aplicaciones, a continuación, algunas recomendaciones.

La sección sellante requiere de potencia adicional en el sistema al requerido para el manejo de la bomba, esta potencia es función de la cabeza dinámica total (TDH), determinada por correlaciones características de cada sello.

- **Potencia del Sello**

- ✓ Serie 400

$$\text{HP}_{\text{sello @ 60 Hz}} = 1.9 + [(5.625 * 10^{-5}) * (\text{TDH}'_2 * \text{etapas})]$$

Ecuación 81

³² AGUILAR APOLO. Op. cit., p. 19, 37, 38, 62, 66, 71, 78.

- ✓ Serie 513

$$HP_{\text{sello @ 60 Hz}} = 2.68 + [(8.25 * 10^{-5}) * (TDH'_2 * \text{etapas})]$$

Ecuación 82

- **Dimensionamiento del Separador de Gas**

- Potencia del Separador de Gas

- ✓ Diámetro de la Bomba ≤ 4 in

$$HP_{\text{sep. gas @ Hz diseño}} = 3.5 * \left(\frac{\text{Hz diseño}}{60}\right)^3$$

Ecuación 83

- ✓ Diámetro de la Bomba > 4 in

$$HP_{\text{sep. gas @ Hz diseño}} = 5 * \left(\frac{\text{Hz diseño}}{60}\right)^3$$

Ecuación 84

- **Otros Cálculos**

Es posible realizar el cálculo del porcentaje de carga y del factor de carga operacional del motor por medio de las Ecuaciones 85 y 86.

$$\% \text{ Carga motor} = \frac{BHP'_2}{BHP_{\text{motor}}} * 100$$

Ecuación 85

$$\text{Factor carga operacional} = \frac{BHP'_2}{BHP_{\text{motor}}} * \frac{\text{frecuencia diseño}}{60}$$

Ecuación 86

3.3.7.1 Acompañamiento del SE en la decisión sobre la elección del motor

- **Voltaje – Amperaje y cable**

La potencia es el producto entre el voltaje y el amperaje. Para una misma potencia y eficiencia del motor se tienen diferentes combinaciones de valores de voltaje y amperaje. Menor amperaje requiere cables más delgados, por lo tanto, se recomienda usar el cable tipo 6; menor amperaje a su vez implica más costos en el controlador de frecuencia.

Por otro lado, mayor amperaje implica altas pérdidas de voltaje, se aconseja usar cables más gruesos, se recomienda el cable tipo 1.

3.3.8 Selección del Cable eléctrico

La selección de un cable requiere de una solución de compromiso entre el tamaño del cable, las pérdidas y el costo. La selección del cable involucra determinar:

- Tamaño del cable
- Tipo de cable
- Longitud del cable

- **Tamaño del cable**

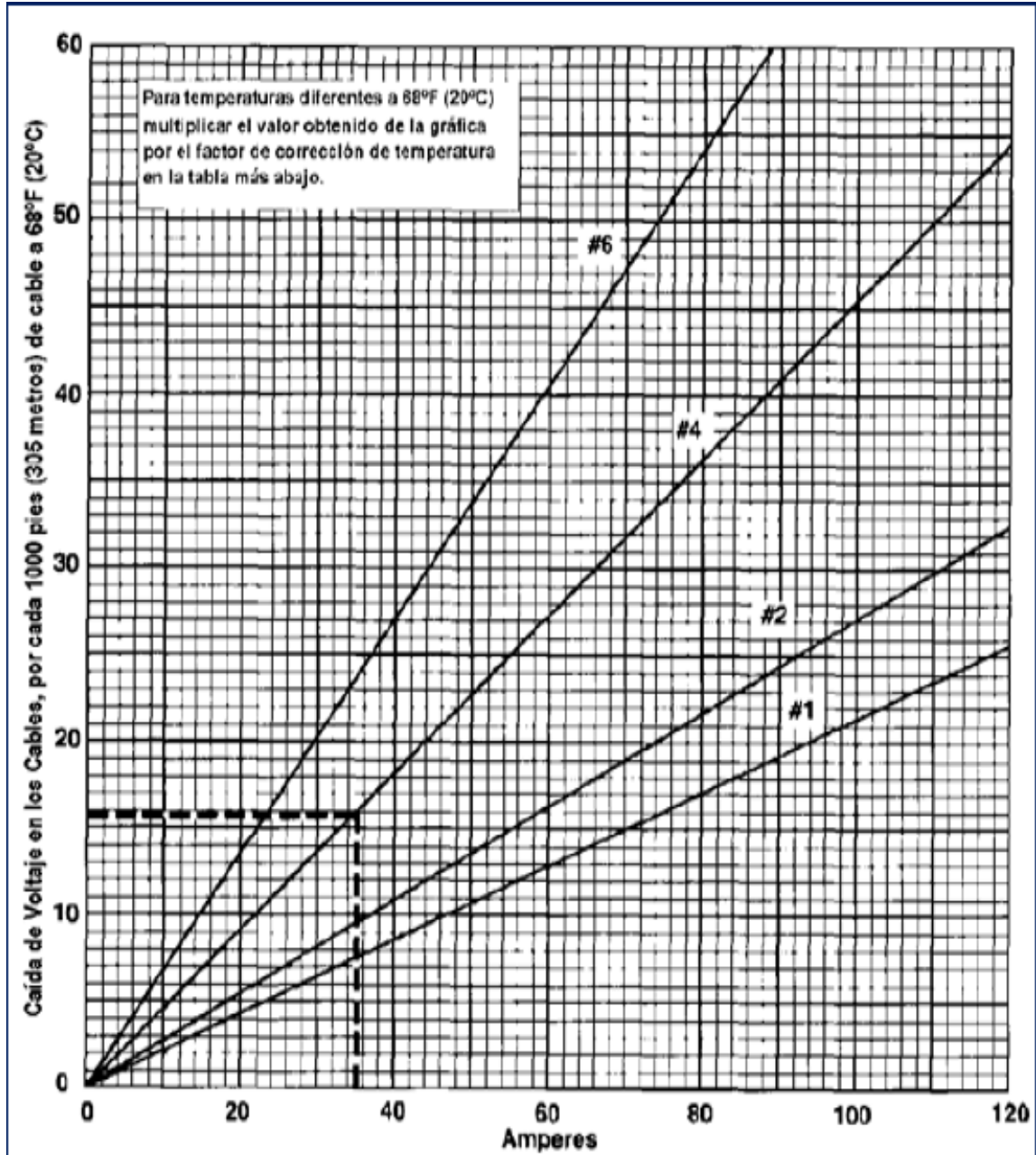
El tamaño adecuado del cable depende de factores combinados de caída en el voltaje, amperaje y espacio disponible entre las uniones de la tubería de producción y la tubería de revestimiento. La Figura 22, muestra la caída de voltaje en diferentes tamaños de cable.

Se recomienda que, para el amperaje del motor seleccionado y la temperatura de fondo de pozo dada, la selección de un tamaño de cable sea tal de asegurar una caída de voltaje de menos de 30 voltios por 1,000 pies para asegurar la capacidad de transporte de corriente del cable.

- Tipo de cable

La selección del tipo de cable se basa primeramente en las condiciones del fluido, la temperatura del fondo de pozo y las limitaciones de espacio dentro del anillo del

Figura 22. Caída de voltaje para diferentes tamaños de cable



Fuente: Baker Hughes – Artificial Lift System

revestimiento. Para seleccionar el tipo de cable de acuerdo a la temperatura se realiza la corrección mostrada en la Ecuación 87.

$$FcT = 0.852 + (0.002185 * T)$$

Ecuación 87

Esta correlación permite determinar la caída de voltaje total determinando la longitud total del cable, utilizando la caída de voltaje, obtenida de la Figura 22 y realizando la corrección de temperatura propuesta en la Ecuación 87.

$$\text{Caída de voltaje total} = \frac{\text{Caída de voltaje} * FcT * \text{Longitud total}}{1000}$$

Ecuación 88

- **Longitud del Cable**

La longitud total del cable debe ser al menos 100 pies más largo que la profundidad establecida para la bomba permitiendo hacer las conexiones en la superficie a una distancia segura de la altura del pozo.

$$\text{Longitud total} = \text{TVD}_p + 100$$

Ecuación 89

3.3.9 Cálculos Adicionales

- Pérdida de Potencia en una fase

Por medio de la Ecuación 90 se puede calcular la pérdida de potencia en superficie.

$$KW_{\text{lost}} = \text{Caída de voltaje total} * \text{Amperaje} * 0.00173 * P_f$$

Ecuación 90

- Voltaje requerido en Superficie

Se puede determinar el voltaje de superficie requerido, que es igual al voltaje de placa del motor más la caída del voltaje:

$$V_{\text{superficie}} = \text{Caída de voltaje total} + \left(V_{\text{placa motor}} * \frac{\text{Frecuencia diseño}}{60} \right)$$

Ecuación 91

- Voltaje requerido por el Motor

El voltaje requerido por el motor se calcula con la Ecuación 92.

$$V_{\text{motor}} = \left(V_{\text{placa motor}} * \frac{\text{Frecuencia diseño}}{60} \right)$$

Ecuación 92

- Potencia del Sistema

Ahora se puede calcular la potencia del sistema con la Ecuación 93.

$$KW = V_{\text{superficie}} * \text{Amperaje} * 0.001732$$

Ecuación 93

- Voltaje mínimo de Arranque del Motor

El voltaje mínimo de arranque del motor es posible determinarlo mediante la Ecuación 94.

$$V_{\text{start up}} = V_{\text{motor}} - (4 * \text{Caída de voltaje total})$$

Ecuación 94

3.3.10 Accesorios y Equipos Opcionales

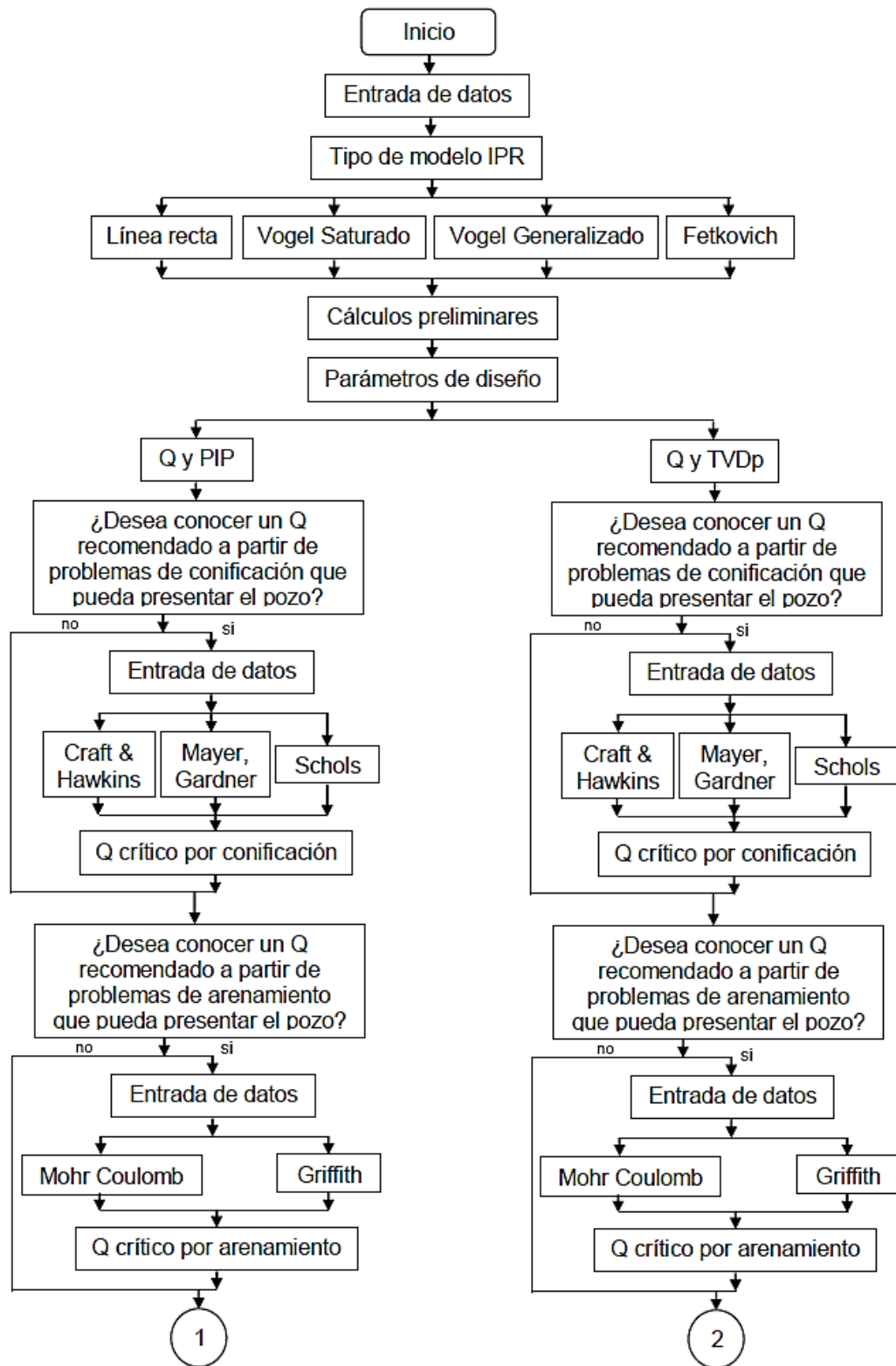
Es necesario verificar los accesorios y elementos adicionales siguientes:

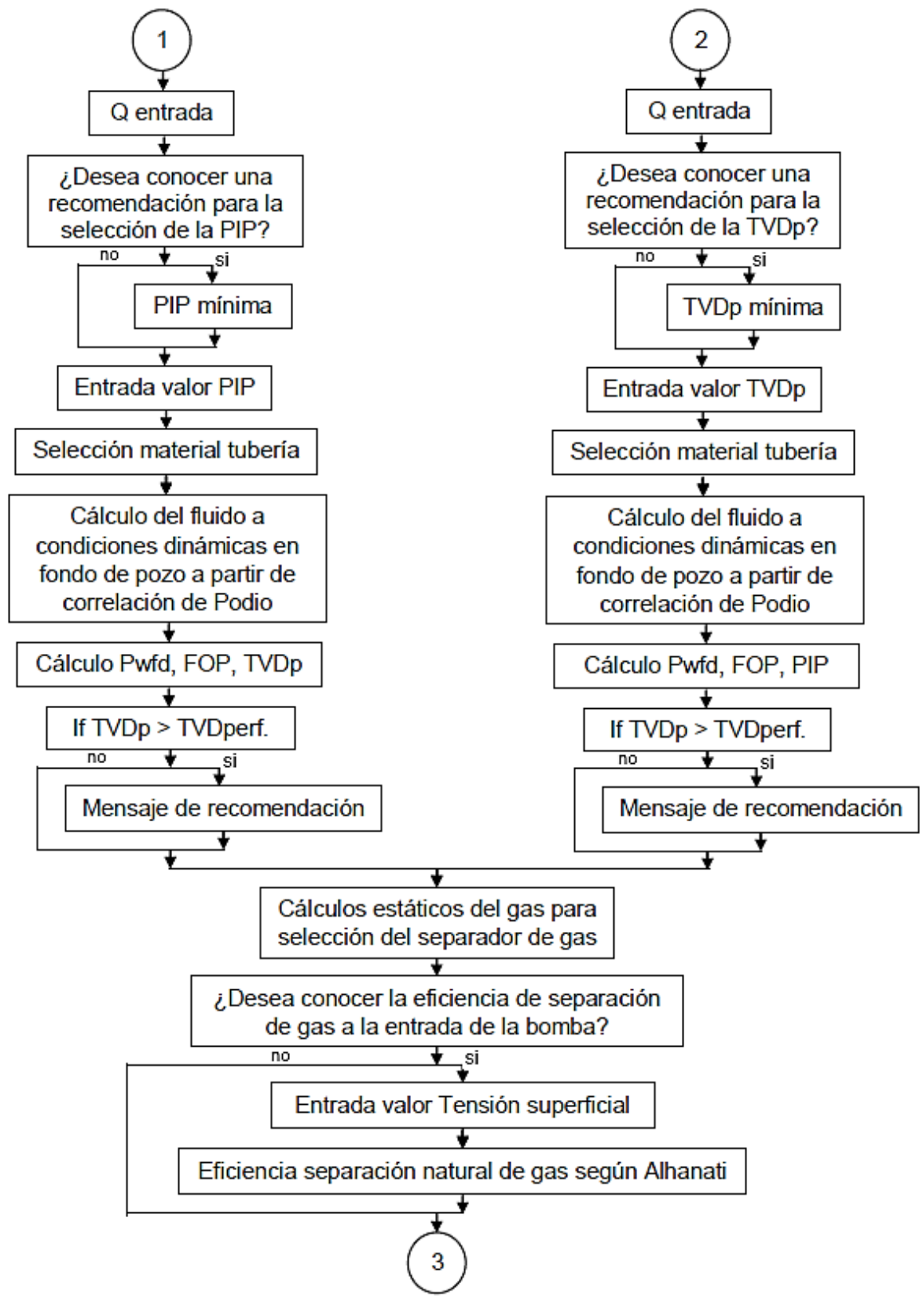
- Cable de extensión al motor (MLE)
- Bandas de cable
- Niple de botella, (crossover) válvula de retención, y válvula de vaciado
- Transformador elevador
- Cable de Superficie
- Cabezal de Pozo
- Conector de Superficie

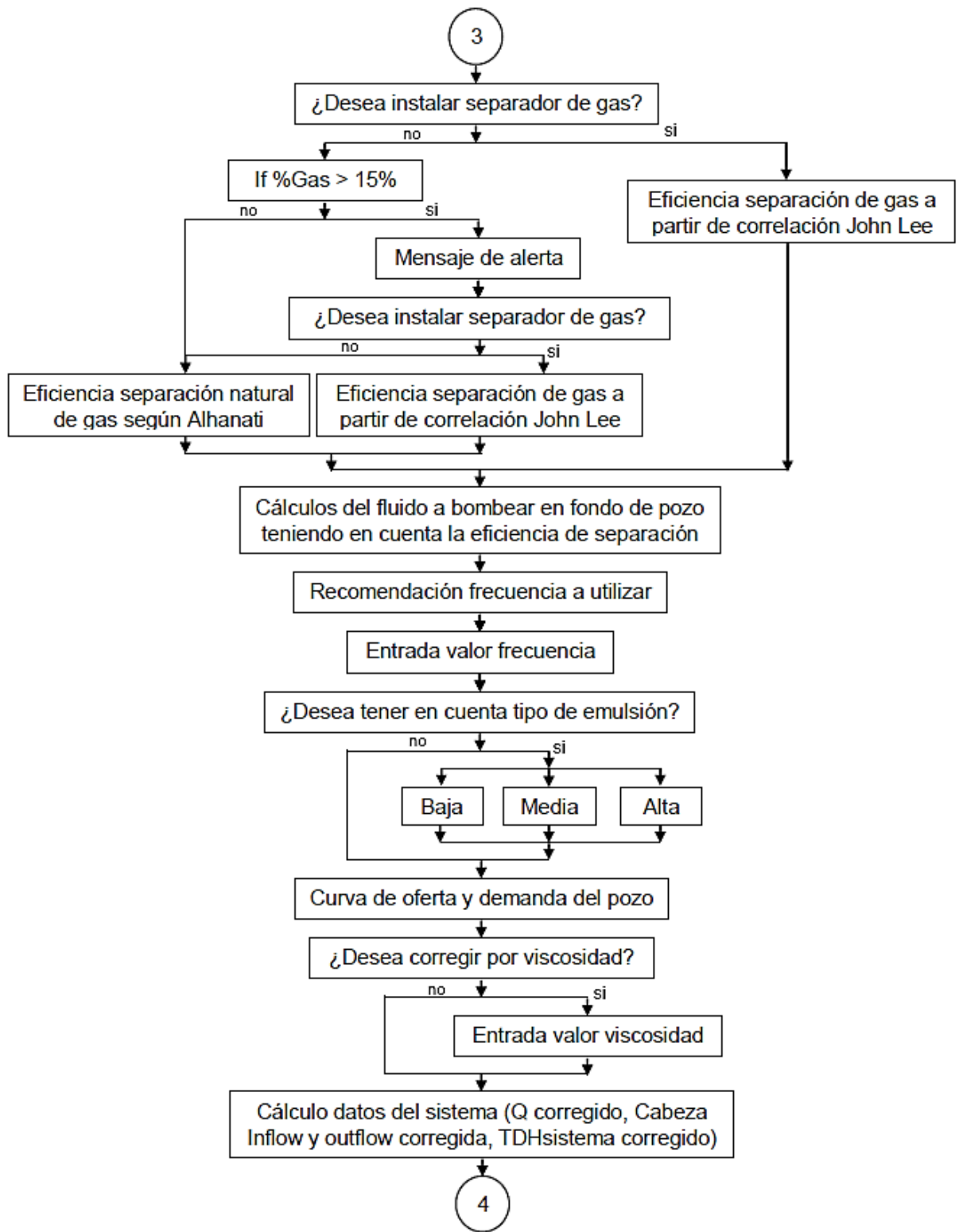
3.3.11 Sistema BES de Velocidad Variable

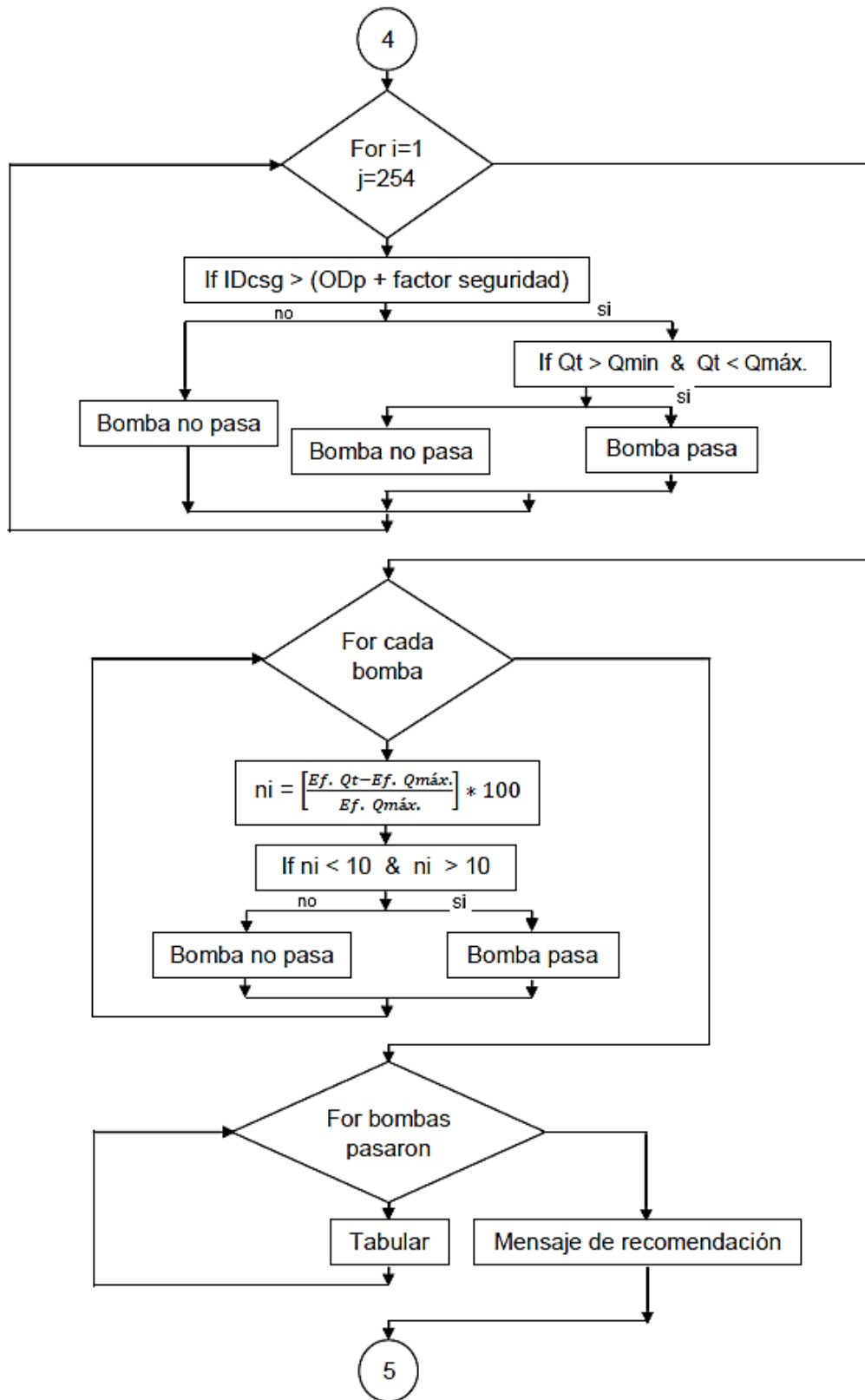
El sistema BES puede ser modificado para incluir un controlador de frecuencia variable de manera que opere con un rango de capacidad, cabeza y eficiencia mucho más amplio. Debido a que un motor de bomba electrosumergible es un motor de inducción, su velocidad es proporcional a la frecuencia del suministro de potencia eléctrica. Ajustando la frecuencia, el sistema de bombeo electrosumergible de velocidad variable ofrece un potencial extraordinario para aumentar la producción, reducir el tiempo improductivo y aumentar las ganancias.

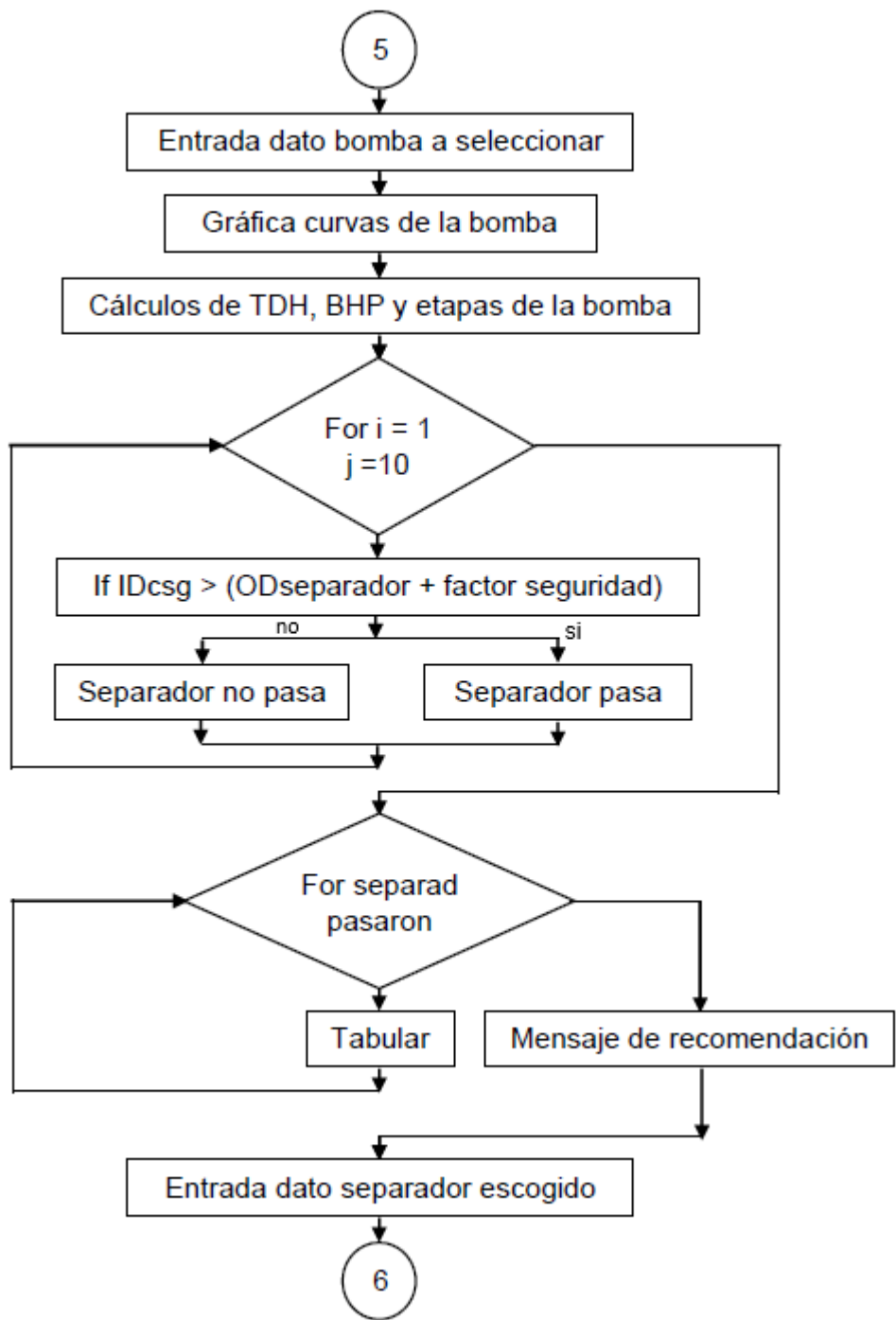
3.4 DIAGRAMA DE FLUJO DE NAVA

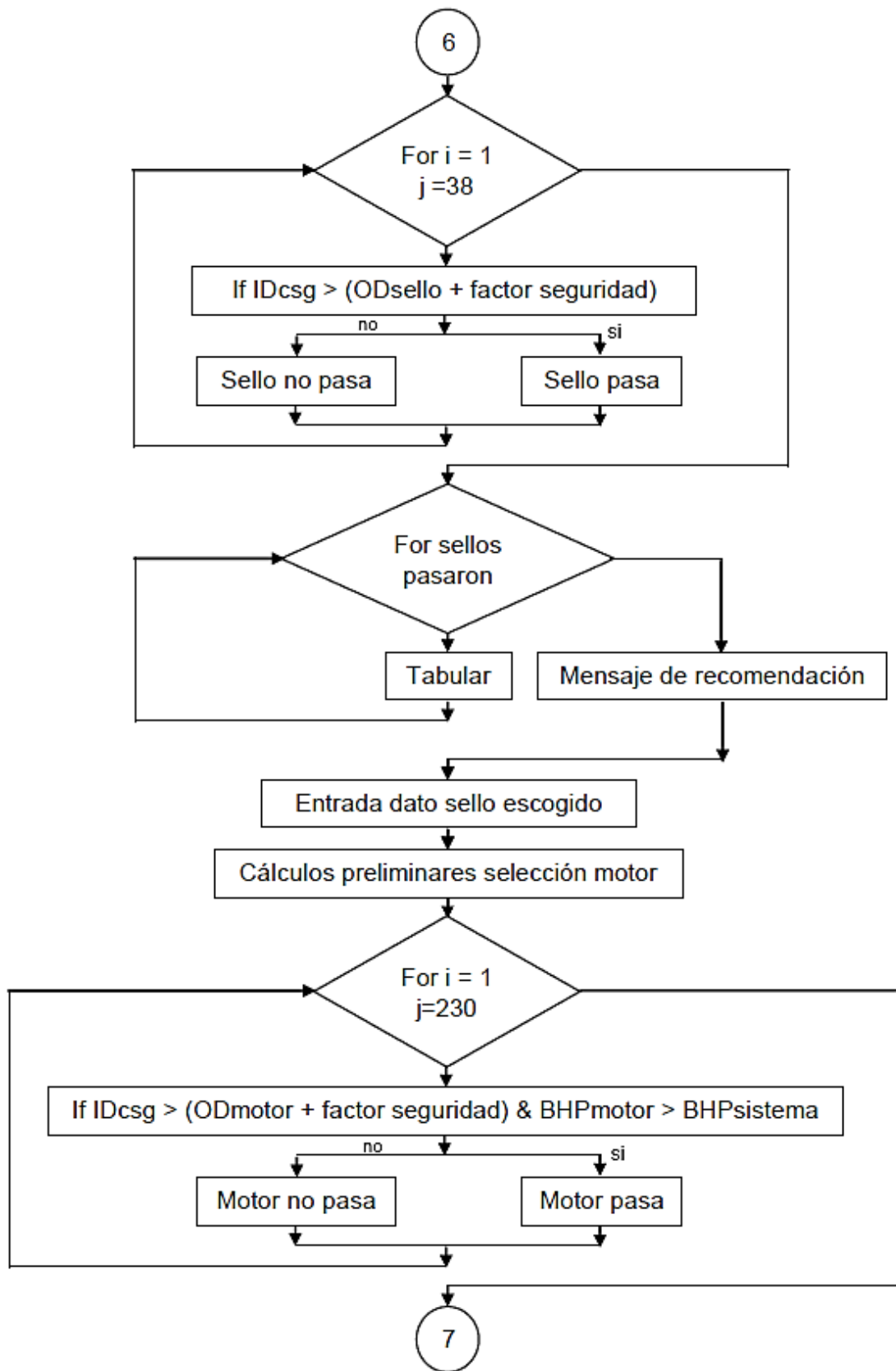


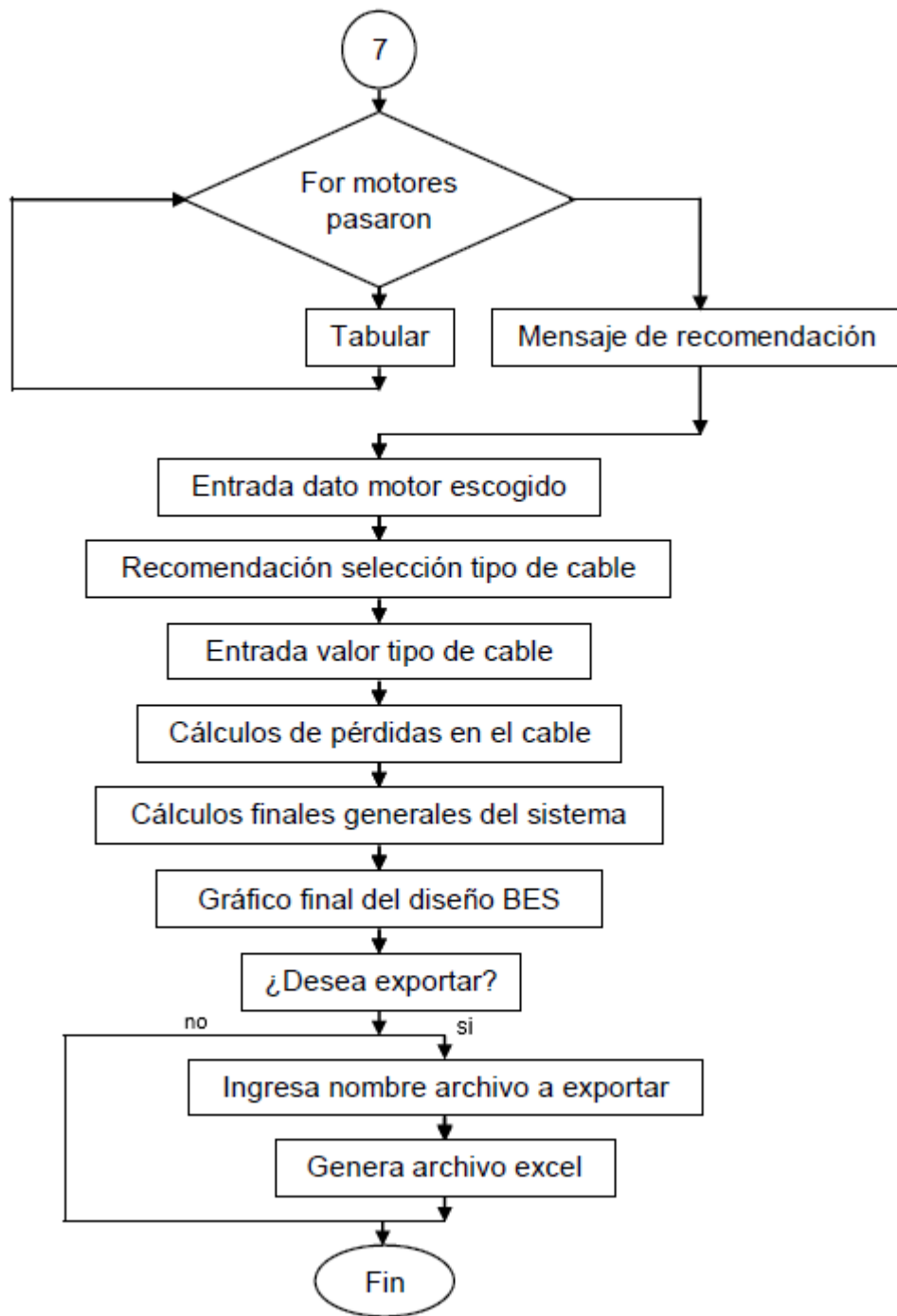












3.5 SEGUIMIENTO

Un buen diseño del sistema por bombeo electrosumergible no es suficiente para asegurar el éxito comercial de un pozo petrolero.

Está claro, que cuando se decide implementar el sistema BES para mejorar las características de levantamiento del pozo, es debido a que el pozo está en la ventana operacional del sistema, es decir, presenta las características mínimas para asegurar el buen funcionamiento del sistema BES; esto es, el contenido de arena, gas libre, máximo caudal y profundidad a trabajar, todos estos ya antes mencionados, además de las consideraciones logísticas necesarias para la viabilidad de la instalación.

Si todo esto se cumple, se supone, el sistema BES será aquel que brinde la mejor rentabilidad económica con respecto a los otros sistemas de levantamiento. Pero estas consideraciones no solo se deben verificar al momento del diseño y la implementación del sistema, si no durante su vida productiva hasta el límite económico. Si las condiciones llegasen a cambiar y cayeran por fuera de la ventana operativa del sistema, no solo está en riesgo la rentabilidad económica del proyecto sino, además, la integridad del sistema y hasta del pozo.

Todo esto hace necesario la implementación de un sistema de seguimiento para verificar que las condiciones apropiadas de producción se mantengan. Con este propósito en mira, se desea construir dentro del software una interfaz que permita el seguimiento del bombeo electrosumergible a partir de datos de producción del pozo. Se aconseja, además, implementar una revisión periódica de la integridad de las partes que constituyen el sistema BES, bomba, el eje, lubricación adecuada, rodamientos en buen estado, válvulas, filtros, conexiones eléctricas, buen funcionamiento del sello y separador, así como el variador de frecuencia, etc.

4. EVALUACIÓN DEL SISTEMA EXPERTO CON EL BES

Se intenta analizar los resultados de NAVA con respecto al diseño efectuado por softwares comerciales en los pozos Cira 2114 (Autograph PC) y Parahuacu 10 (SubPump).

4.1 POZO CIRA 2114

El pozo Cira 2114 presenta un sistema de levantamiento artificial por bombeo electrosumergible, este fue diseñado por Ecopetrol S.A utilizando el software Autograph PC. A continuación, se muestra el diseño NAVA.

Se busca principalmente, a partir de los resultados obtenidos con NAVA, poder hacer una comparación y deducir el éxito del programa.

Figura 23. Portada NAVA Pozo Cira 2114

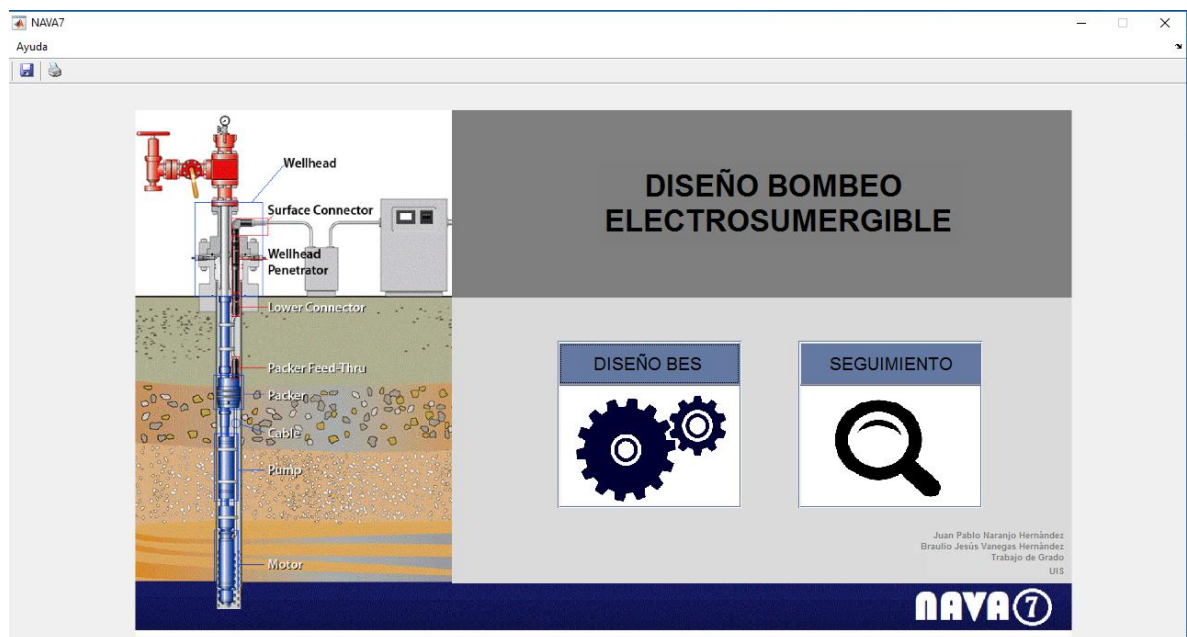


Figura 24. Entrada de datos Pozo Cirá 2114

ENTRADA DE DATOS

DATOS DEL POZO

Profundidad Total (TVD) ft
 Perforaciones Superiores ft
 Perforaciones Inferiores ft
 Punto Medio Perforaciones ft

CASING
 (29,00 lb/ft) ID

TUBING
 (6,50 lb/ft) ID

CONDICIONES DEL FLUIDO DEL POZO

* API
 GE Crudo
 GE Agua

GE Gas

CONDICIONES DEL FLUIDO DEL POZO

Z @ entrada bomba

μ Crudo @ entrada bomba cP

DATOS DE PRODUCCIÓN

Presión del Yacimiento psi
 Presión de Burbuja psi
 Presión en Cabeza (WHP) psi
 Presión en el Casing (CHP) psi
 Temperatura de Fondo °F
 Corte de Agua fracción
 GOR scf / STB

Figura 25. Curva IPR Pozo Cirá 2114

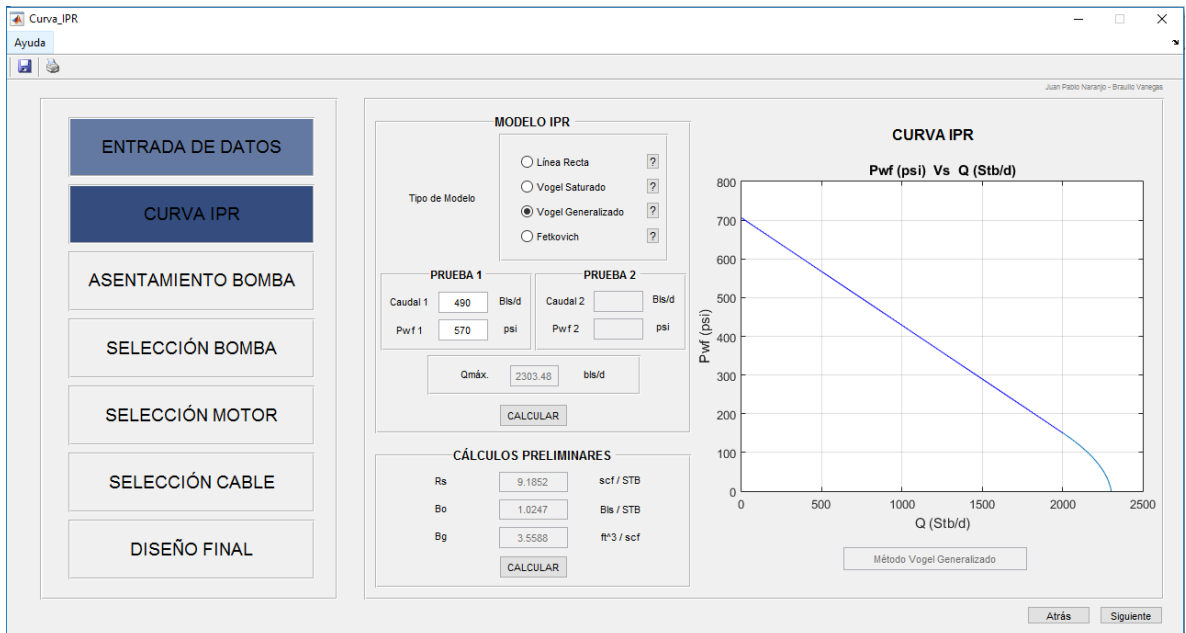


Figura 26. Asentamiento de Bomba Pozo Cira 2114

The screenshot shows the 'Asentamiento_Bomba' software interface. On the left is a navigation menu with buttons: ENTRADA DE DATOS, CURVA IPR, ASENTAMIENTO BOMBA (highlighted), SELECCIÓN BOMBA, SELECCIÓN MOTOR, SELECCIÓN CABLE, and DISEÑO FINAL. The main area is divided into three sections:

- PARÁMETROS DE DISEÑO:**
 - Radio buttons: Se conoce Caudal total y Presión entrada bomba; Se conoce Caudal total y Profundidad bomba.
 - Caudal Total Deseado: 1400 Bls/d
 - Buttons: Conocer caudal crítico por arenamiento, Conocer caudal crítico por conificación
 - Nivel estático: 2300.8656 ft
 - Nivel crítico por arenamiento: 2442.1769 ft
 - Nivel crítico por conificación: 1609.2063 ft
 - Button: CALCULAR
 - Pwf @ Caudal deseado: 317.4286 psi
 - Sumergencia Bomba: 556.8569 ft
 - Presión Entrada Bomba: 278.7554 psi
 - Profundidad Bomba: 2675 ft
- Material tubería revestimiento:**
 - Material: Acero
 - C: 100
 - fr: 0.00012134 psi/ft
 - Button: CALCULAR
- CÁLCULOS GAS A LA ENTRADA DE LA BOMBA:**
 - Gas Libre: 3939.6942 ft³
 - Qo: 71.7294 Bls/d
 - Qw: 1330 Bls/d
 - % Gas: 33.3578 %
 - Button: CALCULAR
 - Radio buttons: No; Sí
 - Text: Eficiencia Separación natural + Separador de gas según John Lee
 - Value: 95 %
 - Button: Conocer la eficiencia de separación natural de gas

At the bottom right are buttons: Atrás, Siguiente.

Figura 27. Caudal crítico Arenamiento Pozo Cira 2114

The screenshot shows the 'Arenamiento' software interface. It contains a text box explaining the concept of maximum permissible flow rate and a table of parameters for calculation.

ARENAMIENTO

Existe un valor de Pwf denominado máxima caída de presión permisible a la cual la formación falla y se produce arenamiento, la presencia de arena en la bomba centrífuga producirá el fallo total de la bomba (contenido máximo de arena: 200 ppm).

MÁXIMO CAUDAL TOTAL PERMISIBLE

Gradiente Presión Poro	0.433	psi/ft
Constante Biot	0.7	
Gradiente P Sobrecarga	0.82	psi/ft
Cohesión	3945	psi
Resistencia a la Tensión	1010	psi
Esfuerzo Cizalla Máximo	4000	psi
MCCP Mohr-Coulomb	449.5063	psi
Q critico Mohr-Coulomb	1619.5448	Bls/d
MCCP Griffith	489.5063	psi
Q critico Griffith	1763.6624	Bls/d

Buttons: CALCULAR, CARGAR EJEMPLO, LIMPIAR DATOS, Listo.

Figura 28. Caudal crítico Conificación Pozo Cira 2114

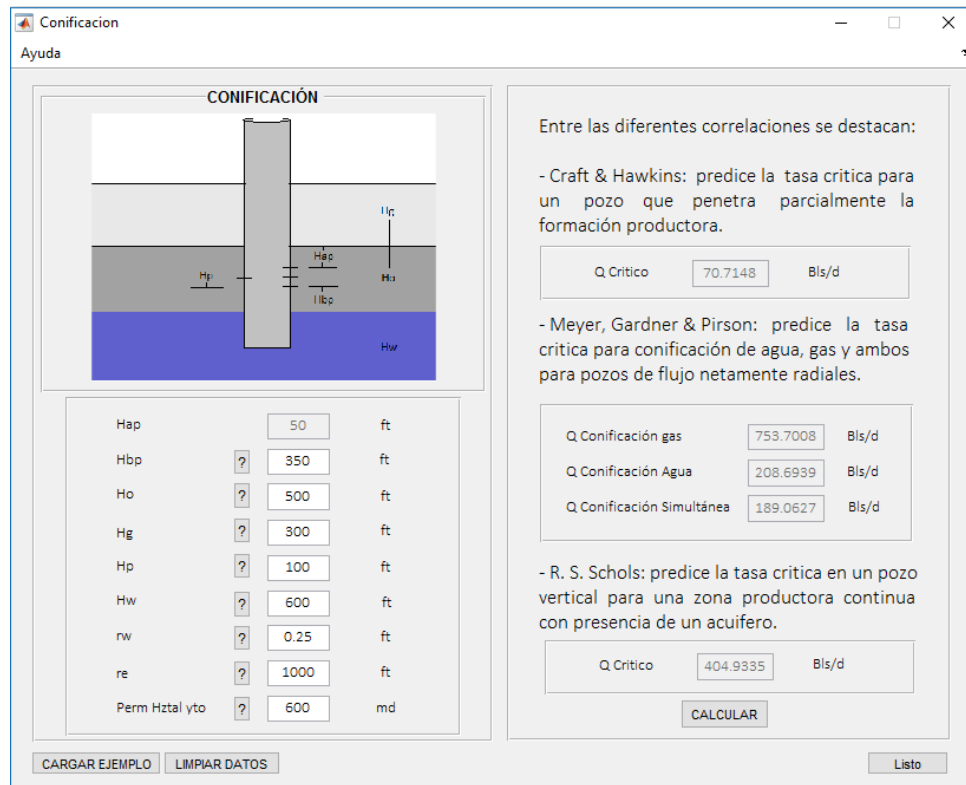


Figura 29. Selección de Bomba Pozo Cira 2114



Figura 30. Selección de Motor-Sello-Separador Pozo Cira 2114

Seleccion_Motor

Ayuda

Juan Pablo Naranjo - Braulio Vanegas

ENTRADA DE DATOS

CURVA IPR

ASENTAMIENTO BOMBA

SELECCIÓN BOMBA

SELECCIÓN MOTOR

SELECCIÓN CABLE

DISEÑO FINAL

Serie	Tipo	OD (in)	
1	387	TVS387	3.87
2	387	TVSD387	3.87
3	387	TVSD387-E	3.87

Inserte # fila SEPARADOR escogido: 5

Serie	Tipo	OD (in)	
1	338mod	LSL	3.38
2	338mod	SB	3.38
3	400mod	LSL	4

Inserte # fila SELLO escogido: 3

Separador escogido: TVSD400 Sello escogido: LSL

POTENCIA REQUERIDA

HP bomba	36.1213	Kw
HP sello	1.9013	Kw
HP separador	3.5	Kw

DISEÑO MOTOR

BHP motor: 41.5225 Kw

% Carga motor: 86.992 %

Factor carga: 0.86992

CALCULAR

Serie	Tipo	OD (in)	
1	375	IL180	3.75
2	456	Std	4.56
3	456	Std	4.56
4	456	Std	4.56

Inserte # fila MOTOR escogido: 6

CALCULAR

BHP requerido: 52.2 Kw

Voltaje requerido: 1229 Voltios

Amperaje requerido: 35 Amperios

Atrás Siguiente

Figura 31. Selección de Cable Pozo Cira 2114

Seleccion_Cable

Ayuda

Juan Pablo Naranjo - Braulio Vanegas

ENTRADA DE DATOS

CURVA IPR

ASENTAMIENTO BOMBA

SELECCIÓN BOMBA

SELECCIÓN MOTOR

SELECCIÓN CABLE

DISEÑO FINAL

DISEÑO CABLE

TIPO DE CABLE: Tipo 6

Longitud total: 2775 Ft

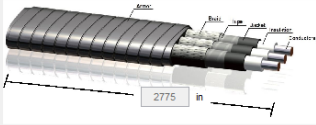
FcT: 1.0989

Caida voltaje / 1000 ft: 23.8636 Voltios

Δ Voltaje total: 72.7712 Voltios

KW lost: 3.9657 Kw

CALCULAR



CÁLCULOS ADICIONALES SISTEMA

Kw sistema: 78.8222 Kw

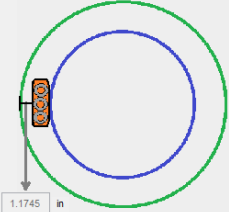
Voltaje superficie: 1301.7712 Voltios

Voltaje requerido motor: 1229 Voltios

Voltaje min. arranque: 937.9151 Voltios

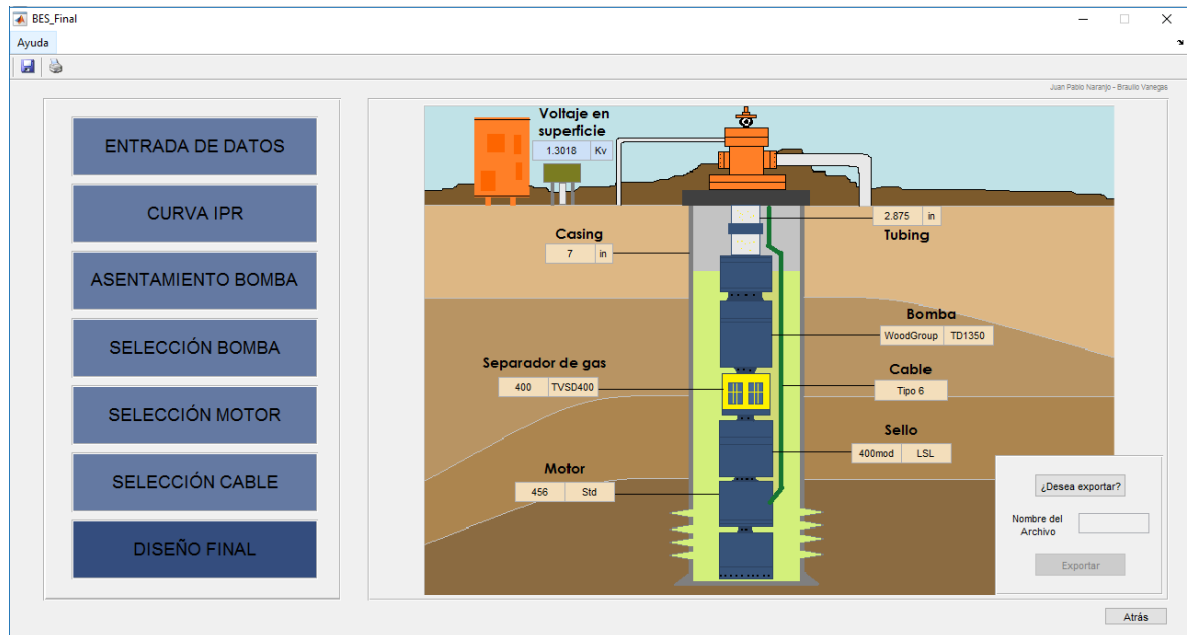
Tolerancia cable: 1.1745 in

CALCULAR



Atrás Siguiente

Figura 32. Diseño Final Pozo Cira 2114



4.2 POZO PARAHUACU 10

El pozo Parahuacu 10, ubicado en el bloque 57 de la estructura petrolera de Colombia presenta también un sistema de levantamiento artificial por bombeo electrosumergible.

Con este pozo se intenta principalmente, al igual que con Cira 2114, a partir de los resultados obtenidos con NAVA, poder hacer una comparación y deducir el éxito del programa.

Cabe destacar que esta comparación será respecto a otro software comercial empleado; SubPump, el cual es el software utilizado por la compañía Schlumberger. Baker Hughes acostumbra a usar por otro lado, el Software Autograph PC, que fue el software empleado en el diseño Cira 2114.

Figura 33. Portada NAVA Pozo Parahuacu 10

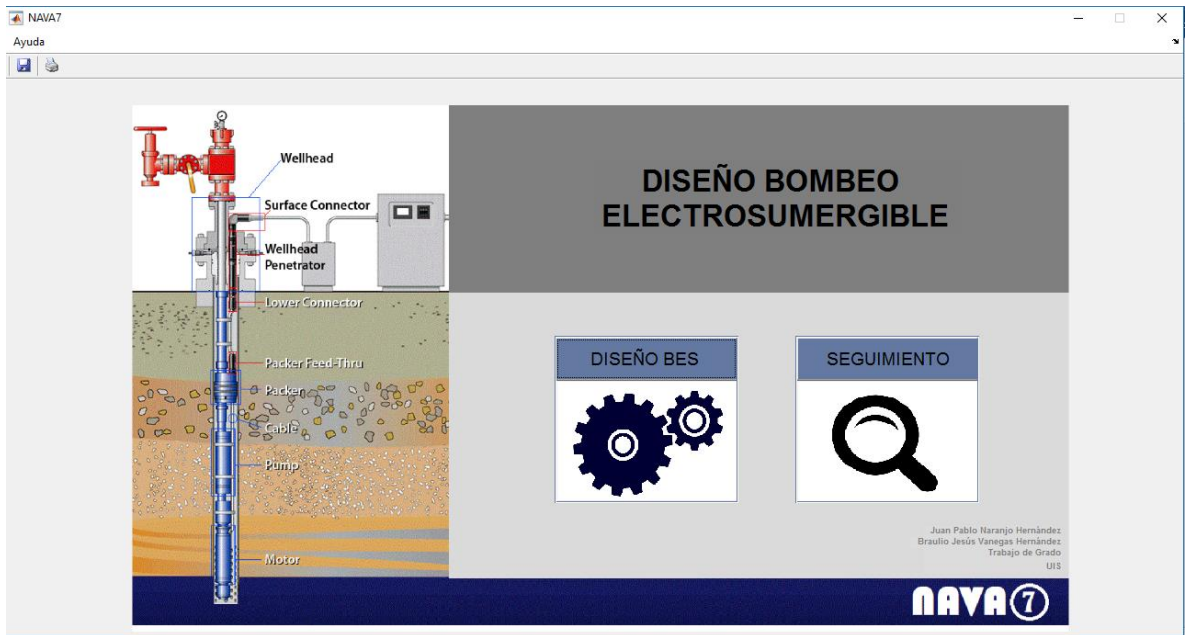


Figura 34. Entrada de Datos Pozo Parahuacu 10

Figura 35. Curva IPR Pozo Parahuacu 10

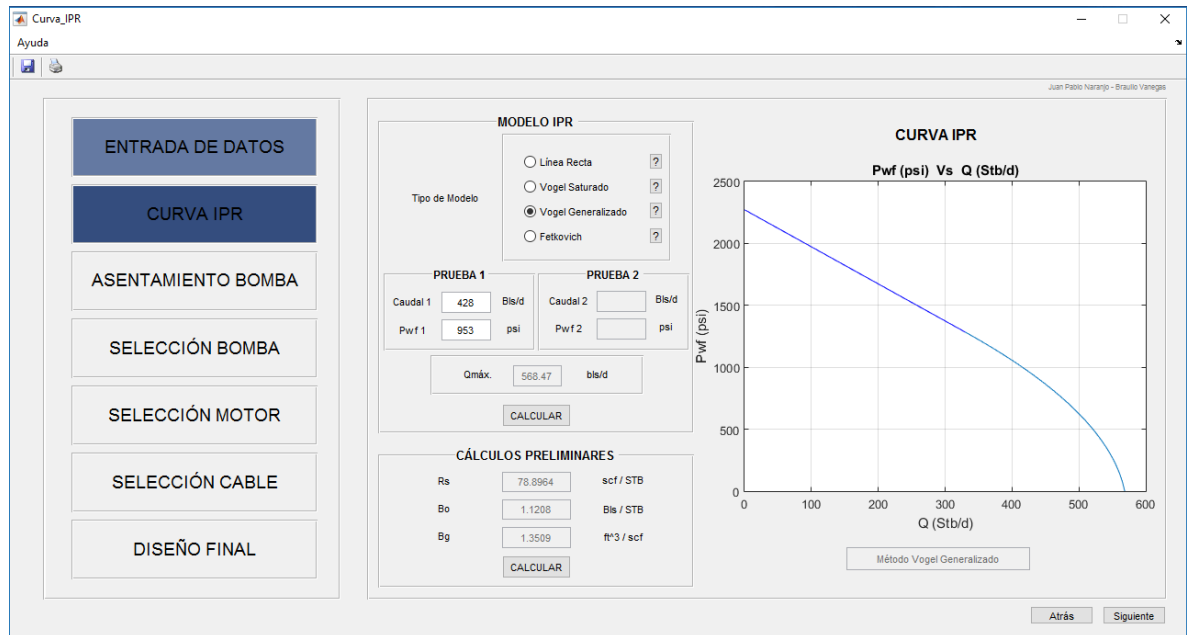


Figura 36. Asentamiento de Bomba Pozo Parahuacu 10

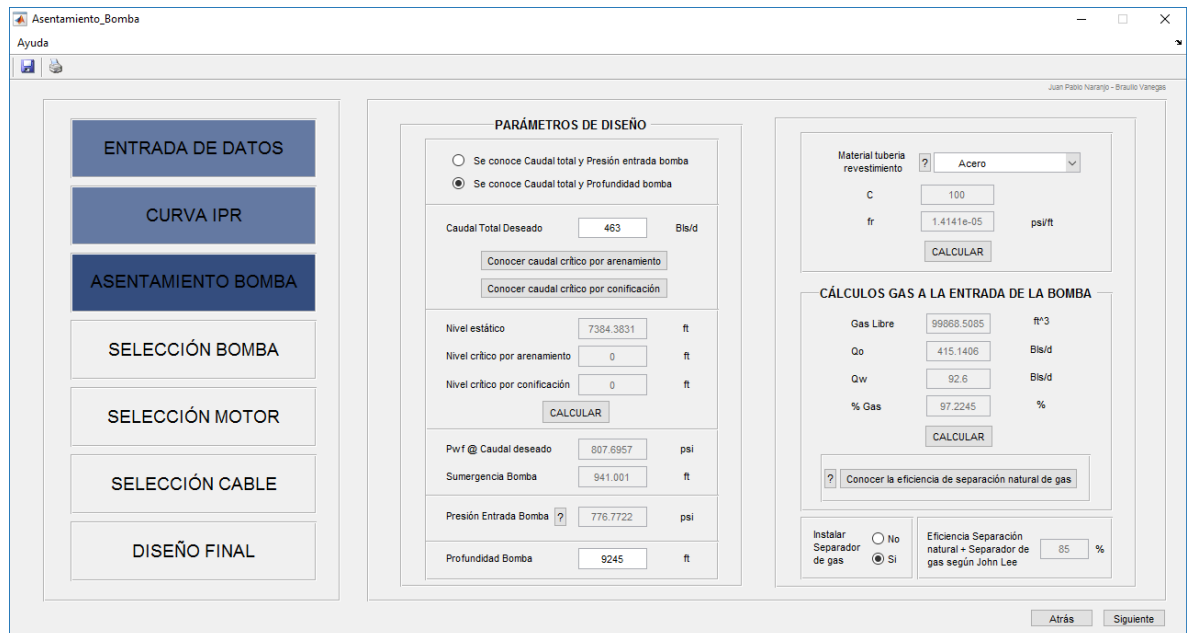


Figura 37. Selección de Bomba Pozo Parahuacu 10



Figura 38. Selección de Motor-Sello-Separador Pozo Parahuacu 10

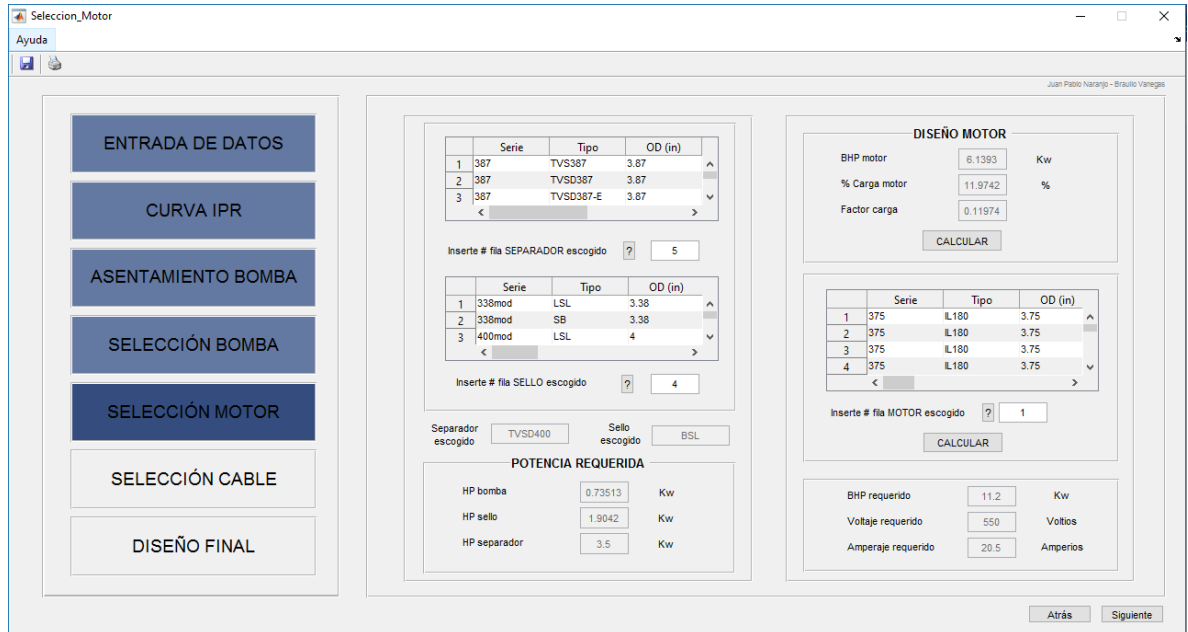


Figura 39. Selección de Cable Pozo Parahuacu 10

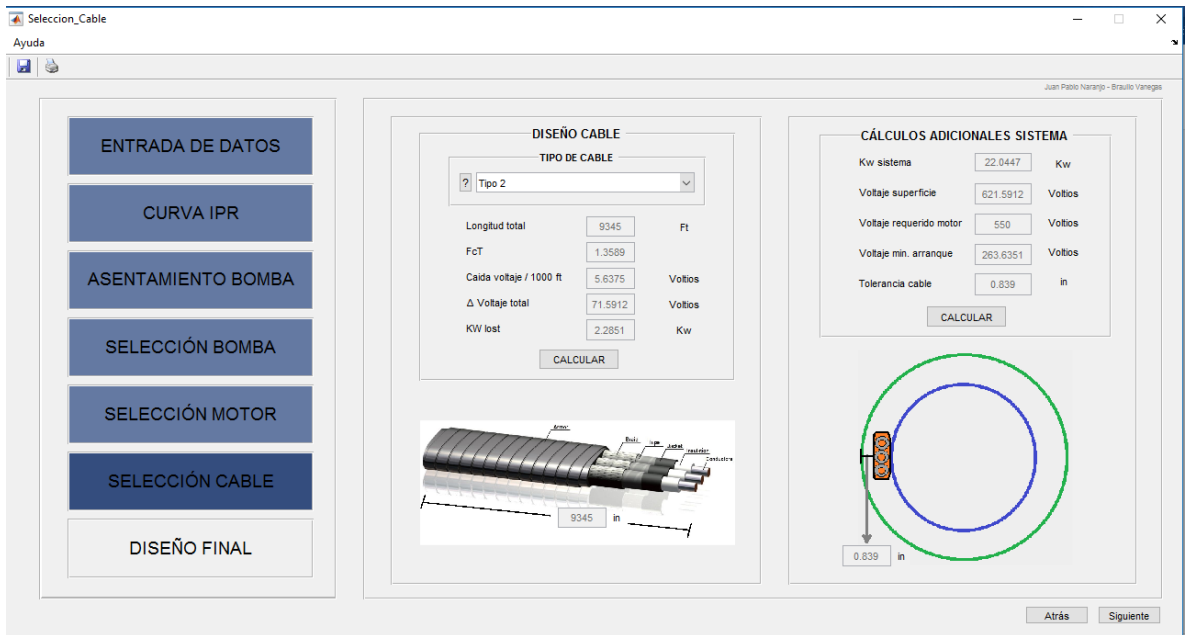
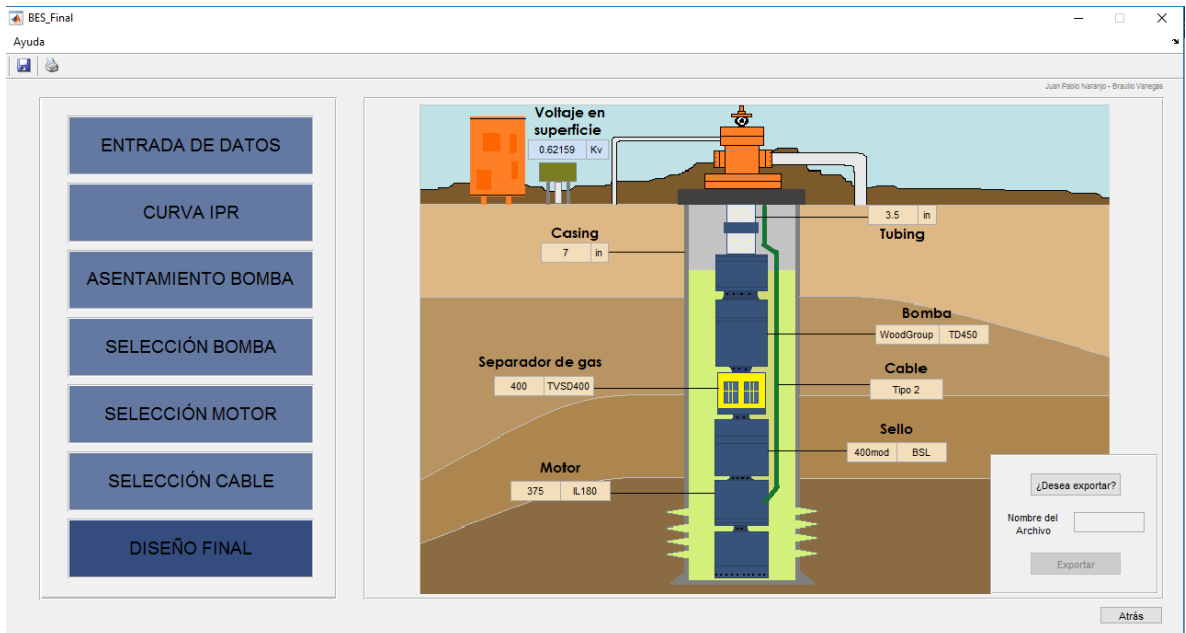


Figura 40. Diseño Final Pozo Parahuacu 10



4.3 ANÁLISIS DE RESULTADOS

Después de haber desarrollado el diseño BES para los pozos Cira 2114 y Parahuacu 10 usando el software NAVA, es necesario comparar los resultados obtenidos y así de esta manera evaluar su eficacia.

4.3.1 Pozo Cira 2114

Tabla 4. Comparación NAVA y AutographPC

	DISEÑO NAVA POZO CIRA 2114	DISEÑO AUTOGRAPH PC POZO CIRA 2114	Error (%)
Rs (scf/stb)	9.185	-	-
Bo (bls/stb)	1.025	1.03	0.49
Bg (ft ³ /scf)	3.559	-	-
Q (blsd)	1400	1400	0.00
Pwf @ Q (bls)	317.43	317	0.14
PIP (psi)	278.76	289	3.54
TVD bomba (ft)	2675	2737	2.27
FOP (ft)	556.86	443.42	25.58
% Gas fondo	33.36	-	-
Frecuencia (Hz)	60	55.3	8.50
TDH sistema (ft)	2676.53	2933	8.74
TDH bomba (ft)	22.5	23.65	4.86
BHP bomba (Kw)	0.3035	0.276	9.96
# Etapas	119	124	4.03
HP sello (Kw)	1.9	1.52	25.00
HP separador (Kw)	3.5	5.978	41.45
BHP motor (Kw)	41.52	41.74	0.53

	DISEÑO NAVA POZO CIRA 2114	DISEÑO AUTOGRAPH PC POZO CIRA 2114	Error (%)
Voltaje (Volt)	1229	1387	11.39
Amperaje (Ampere)	35	26.68	31.18
Long cable (ft)	2775	2853	2.73
Caída voltaje (Volt)	72.77	59.27	22.78
Voltaje superf (Volt)	1301.77	1446	9.97
% Carga motor	86.99	67.59	28.70
Caída HP (Kw)	3.96	2.726	45.27
HP sistema (Kw)	78.82	66.83	17.94

La primera decisión por parte de NAVA en cuanto al diseño del pozo Cira 2114, fue establecer tanto la profundidad de asentamiento de la bomba como el caudal total a trabajar.

Los datos geomecánicos muestran que para caídas de presión entre 450 a 490 (psi) se presentará arenamiento en el yacimiento; esto implica que a caudales totales mayores a 1620 (blsd) el pozo podría presentar problemas operacionales respecto a la producción de arena.

Por otro lado, se observa caudales críticos en cuanto a conificación más restrictivos, el valor más permisible para gas es 700 (blsd) y para agua está entre 200-400 (blsd); estos valores están por debajo del 40% del AOF del pozo, por lo que se recomienda no tenerlos en cuenta pues resultaría más costoso dejar de producir crudo que tratar cantidades de agua y/o gas.

De esto se deduce que el valor propuesto por Ecopetrol S.A para desarrollar el pozo Cira 2114 está dentro de lo recomendado, por lo que se decide implementar el mismo caudal en el software NAVA.

Respecto a la profundidad de asentamiento de la bomba, los cálculos muestran que se esperaría una columna estática de unos 600 ft, por lo que al establecer la Profundidad de asentamiento de la bomba 100 ft arriba de los perforados superiores, se respetaría una sumergencia mayor a 400 ft; lo que posteriormente confirmaron los cálculos dinámicos.

Ecopetrol S.A. propuso una profundidad de asentamiento de la bomba 20 ft arriba del tope de los perforados, probablemente porque la producción depende del aporte de los inyectores.

La segunda decisión que tuvo que tomar NAVA fue el instalar o no el separador en fondo de pozo. NAVA decide implementarlo al igual que ECOPETROL S.A, pues NAVA encuentra un % gas en fondo de pozo igual al 30 %, siendo 10-15 % el límite recomendable.

NAVA al no contar con las pruebas de sistema necesarias para escoger la frecuencia de diseño, decide trabajar con la frecuencia estándar de 60 Hz.

La selección de la bomba fue estrictamente bajo el criterio de trabajar la bomba al caudal más cercano a su eficiencia máxima, por lo que se escogió el diferencial de eficiencia mínimo. ECOPETROL S.A en los informes pareciera tener predominancia hacia bombas Centrilift, quizás por experiencia, de ahí que su bomba escogida fuera una de ellas.

NAVA por otro lado, aunque presentaba datos de bombas Centrilift con buenos diferenciales de eficiencia, la bomba WoodGroup se diferenciaba en este aspecto, por lo cual fue escogida.

Notar que la potencia requerida en las bombas seleccionadas es muy parecida. El sello al igual que Ecopetrol S.A se escoge considerando la misma serie de la bomba y así evitar acoplamientos.

En la selección del motor NAVA plantea un balance entre voltaje y amperaje según las recomendaciones del sistema experto; Ecopetrol parece haber hecho el mismo análisis, de ahí que los valores en amperaje y voltaje sean parecidos.

En conclusión, el diseño NAVA del pozo Cira 2114 fue muy parecido al diseño hecho por Autograph PC; incluso, en teoría es más eficiente. Por lo que se deduce que NAVA cumplió las expectativas y es funcional.

4.3.2 Pozo Parahuacu 10

Tabla 5. Comparación NAVA y SubPump

	DISEÑO NAVA POZO PARAHUACU 10	DISEÑO SUBPUMP POZO PARAHUACU 10	ERROR (%)
Rs (scf/stb)	78.89	-	-
Bo (bls/stb)	1.12	.	-
Bg (ft ³ /scf)	1.35	-	-
Q (blsd)	463	463	0.00
Pwf @ Q (bls)	807.69	778.2	3.79
PIP (psi)	776.77	689.1	12.72
TVD bomba (ft)	9245	9245	0.00
FOP (ft)	941	917	2.62
% Gas fondo	97.22	93.4	0.00
Frecuencia (Hz)	60	55	9.09
TDH sistema (ft)	2205	2198	0.32
TDH bomba (ft)	74.15	70.3	5.48

	DISEÑO NAVA POZO PARAHUACU 10	DISEÑO SUBPUMP POZO PARAHUACU 10	ERROR (%)
BHP bomba (Kw)	0.024	0.022	9.09
# Etapas	30	32	6.25
HP sello (Kw)	1.9	1.8	5.56
HP separador (Kw)	3.5	4.5	22.22
BHP motor (Kw)	6.14	7	12.29
Voltaje (Volt)	550	413	33.17
Amperaje (Ampere)	20.5	29	29.31
Long cable (ft)	9345	9350	0.05
Caída voltaje (Volt)	5.63	4.5	25.11
Voltaje superf (Volt)	621.6	600	3.60
% Carga motor	11.97	19.4	38.30
Caída HP (Kw)	2.28	3.5	34.86
HP sistema (Kw)	22.044	25	11.82

A falta de datos geomecánicos se decide diseñar el pozo con el caudal recomendado por el diseño real. Cabe aclarar que el caudal recomendado se encuentra en la zona de dos fases, es decir, hay presencia de gas. Aunque esto no es muy recomendable, si no se produjera de esta manera el caudal que se podría extraer del pozo sería un porcentaje muy mínimo del AOF.

Respecto a la profundidad de asentamiento de la bomba, se decide igualmente tomar el mismo valor usado en el diseño real. Ya que es un dato coherente y el cual permitirá, habiendo establecido Q y TVDp, comparar de una manera más objetiva los dos diseños.

Como era de esperarse (ya que se producía en zona de dos fases), fue necesario instalar separador.

NAVA al no tener argumentos para seleccionar otra frecuencia decide trabajar 60 Hz, diferente a los 55 que trabajo SubPump.

Igual que en Cira 2114, la selección de la bomba fue estrictamente bajo el criterio de trabajar la bomba al caudal más cercano a su eficiencia máxima, por lo que se escogió el diferencial de eficiencia mínimo.

En la selección del motor NAVA plantea un balance entre voltaje y amperaje según las recomendaciones del sistema experto; SubPump parece haber hecho el mismo análisis, de ahí que los valores en amperaje y voltaje sean parecidos.

La conclusión es la misma que para el pozo Cira 2114. Esta es, que el diseño NAVA fue muy parecido al diseño real; se evidencia principalmente en los gastos de potencia requeridos en ambos diseños, lo cual es el aspecto más importante en el diseño BES.

Por lo que se deduce otra vez, que NAVA cumplió las expectativas y es funcional.

Una observación importante a partir del diseño del pozo Parahuacu 10, es el hecho del bajo BHP requerido por la bomba. Esto se debe a que Parahuacu 10 es un pozo de alto GOR, tal que aun después de haber instalado separador en fondo, tiene alta presencia de gas libre.

El gas libre aligera la columna de fluido; pero puede tomar una de dos trayectorias, puede volver a gas en solución con el aumento de presión en la bomba o comprimirse como gas libre, la segunda opción es la más esperada debido a los efectos de alta velocidad y turbulencia. El gas al comprimirse y bombearse como gas libre, produce efectos de cavitación y desgaste en la bomba amenazando la integridad del equipo.

Por lo que se deduce que, en primera instancia, Parahuacu 10 no es un buen pozo candidato para implementar un SLA por BES.

5. CONCLUSIONES

- Se evidencia funcionalidad del programa. NAVA presenta resultados alternativos, teniendo en cuenta consideraciones más restrictivas y equipos más eficientes, donde no se observa gran diferencia entre el diseño final NAVA y los diseños comerciales. Esto se concluye a partir del análisis de resultados del capítulo 4.
- Es posible deducir un algoritmo más completo académicamente, con más bases de ingeniería y el cual toma en cuenta más aspectos en general. NAVA implementa este diseño, principalmente agregando correcciones de la metodología Schlumberger (columna dinámica, separación natural de gas, entre otros) y Daniel Bustamante (corrección por viscosidad, tipo de emulsión, criterio de selección bomba, entre otros) a la metodología de Baker.
- El sistema experto que propone NAVA tiene dos ventajas. La primera de ellas es el ahorro del tiempo de análisis en la toma de decisiones por parte del usuario; la segunda, mejora las habilidades en el proceso de diseño BES, tal que, el usuario pueda desarrollar el diseño sin necesidad de ser un experto en el tema.
- NAVA puede llegar a ser una herramienta indispensable para el ingeniero de producción. Es necesario garantizar que el sistema esté funcionando correctamente; NAVA, a partir de la plataforma de seguimiento implementada, monitorea variables como presión casing, tubing y en la entrada bomba, temperatura motor, cantidad arena y gas, con el fin que el sistema se mantenga dentro de la ventana operativa.

6. RECOMENDACIONES

- Se recomienda tener valores de alto grado de certeza como parámetros de entrada al programa; valores errados o de alta incertidumbre ocasionaran un mal diseño, lo que conllevara a un mal funcionamiento del pozo.
- Se recomienda una vez instalado el BES en un pozo petrolero, medir las variables de producción, principalmente el caudal, y así compararlo con los valores de diseño; cualquier diferencia grande evidenciará una anomalía en el funcionamiento BES, tal que el ingeniero de producción deberá detectar fallas e inconsistencias para tomar las medidas necesarias.
- Es recomendable evaluar todos los parámetros del sistema, vida útil de los equipos, costo de mantenimiento, consumo de energía, posibilidad de una mejora tecnológica, entre otros; y de esta manera llevar un mejor control del proceso.
- Se recomienda llevar monitoreo, además de las variables mostradas en la interfaz de seguimiento NAVA, de las presiones que está manejando el pozo, pues esta información alerta sobre cualquier optimización que se le pueda hacer al sistema BES.
- Aunque la instalación de la bomba se pueda hacer en la zona de los perforados o debajo de esta, se recomienda instalarla por encima. De esta manera evitar desgaste en la bomba y tanto caballaje como cable extra.
- Ampliar la base de datos de NAVA en cuanto a motor y sello. Aunque NAVA establece una base de datos bastante funcional, la mejora en el programa sería importante al extender esta.

- Dotar al programa computacional de una interfaz adicional que permita diseñar los accesorios necesarios en el sistema BES, principalmente accesorios de superficie, conexiones, nipples y válvulas.
- Se recomienda implementar en una futura versión del NAVA el espacio para desarrollar un diseño en pozos no verticales.
- Se propone para una futura versión de NAVA, implementar paulatinamente los demás sistemas de levantamiento artificial, incluso, de ser posible, desarrollar un método para la selección del SLA más óptimo en un pozo petrolero.
- A medida que existan avances en tecnología y estudios respecto al SLA por bombeo electrosumergible, se recomienda ir actualizando el sistema experto de NAVA, en especial los rangos de operación.
- Aunque NAVA en teoría propone una selección de equipos eficiente; hay que tener en cuenta que no considera la experiencia del usuario con ciertas marcas y referencias de equipos. Este conocimiento debería ser tenido en cuenta al momento de escoger los equipos, debido a que interviene en la eficiencia global del proceso.

BIBLIOGRAFÍA

- ACOSTA MIRELA, María Carolina. Programa computarizado para el cálculo de la tasa crítica por conificación de agua y/o gas. Trabajo de grado presentado para optar por el título de Magíster en ingeniería de Petróleos, Universidad de Zulia, Maracaibo, 2005.
- AGUILAR APOLO, Lenin José. Estudio de confiabilidad en los equipos de bombeo electrosumergible, mediante análisis de fallas en los bloques 14 y 17. Trabajo de grado presentado para optar por el título de ingeniero en Petróleos, Quito, 2014.
- AHMED, Tarek. Reservoir engineering handbook 3ra edition. United States of America, 2006.
- API RP 11S2. Recommended Practice for Electric Submersible Pump testing. Second Edition, October 1997.
- API RP 11S4. Recommended Practice for Sizing and Selection of Electric Submersible Pump Installations. First Edition, May 1993.
- API RP 11S5. Recommended Practice for Application of Electric Submersible Cable Systems. First Edition, February 1993.
- BACÓN PAREDES, Fernando Giovanni. Estudio del sistema de bombeo electrosumergible, del campo Lago Agrio, mediante el software Subpump 7.0. Quito-Ecuador, 2010.
- BAKER HUGHES, Centrilift Submersible Pump Handbook, ninth edition, USA, 2009.
- BANZER S, Carlos. Correlaciones PVT. Maracaibo, Enero 1996.
- BORETS, Electric Submersible Pump Technology. Product catalog, 2011.
- BUSTAMANTE VILLAMAR, Daniel Adolfo. Metodología para el desarrollo de un programa de cómputo para el diseño de bombeo electrosumergible y su aplicación. Trabajo de grado para optar por el título de ingeniero de Petróleos. Escuela Superior Politécnica del Litoral, Ecuador, 2007.

- CAMACHO JUAREZ, Fabián Alejandro. CERVANTES BIRUETE, Rafael. Desarrollo de un sistema experto para diseño y optimización operativa del bombeo mecánico. Trabajo de grado presentado para optar por el título de Ingeniero Petrolero, UNAM, México, 2013.
- COLMENARES DÍAZ, Luis Carlos. ORTEGA RUEDA, Freddy Augusto. Modelo para determinar las posibles causas del arenamiento de los pozos productores de petróleo con base en la hipótesis de Griffith/Mohr-Coulomb. Trabajo de grado presentado para optar por el título de Ingeniero en Petróleos, Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, 1992.
- CRUZ OSORNIO, Edgar. Sistema Experto para la selección de los sistemas artificiales de producción aplicables en pozos de aceite. Trabajo de grado presentado para optar por el título de Maestro en Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, México, 2015.
- ECONOMIDES, Michael J, Petroleum Production systems. New Jersey, 1993.
- MÁRQUEZ, Richard. Diseño y optimización de un sistema de levantamiento artificial por bombeo hidráulico. Universidad de Zulia, Maracaibo, 2010.
- MARTINEZ AGUAS, Juan Carlos. Implementación de base de datos que permite administrar la información diaria de producción del capo Tibú. Trabajo de grado presentado para optar por el título de Ingeniero en Petróleos, Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, 2011.
- NIÑO RINCÓN, José Rafael. RINCON BARRERA, Alexander. Simulación analítica y numérica de los fenómenos de codificación y cresting en los pozos vertical Apiay 16 y horizontal Guatiquía 3H. Trabajo de grado presentado para optar por el título de Ingeniero en Petróleos, Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, 2000.
- ORTEGA BENAVIDES, Horacio Andrés. Diseño de un sistema experto para la aplicación de un bombeo hidráulico Jet en pozos productores de aceite. Tesis maestría Universidad Autónoma de México.

- PEÑA SUESCÚN, Fredy Alonso. Proyecto de grado en la modalidad de práctica empresarial bombeo electrosumergible. Descripción, diseño y monitoreo. Schlumberger-WCP-Artificial Lift System. UIS, 2005.
- PERTUZ SIERRA, Gustavo Adolfo. 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. Universidad Industrial de Santander, 2005.
- RAMÍREZ, Marta. Bombeo Electrosumergible: Análisis, Diseño, Optimización y Trouble Shooting. Esp Oil International Training Group, Venezuela, 2004.
- RANGEL SILVA, William Alberto. TORRES LEON, Jorge Wilson. Análisis de datos de producción a nivel de completamiento para la asignación de la producción del campo Colorado. Trabajo de grado presentado para optar por el título de ingeniero en Petróleos, Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, 2008.
- SÁNCHEZ ROMERO, Filiberto. Diseño de un sistema experto para la aplicación del bombeo mecánico intermitente en pozos productores de aceite, Trabajo de grado presentado para optar por el título de Maestro en Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, México, 2014.
- SAVEDRA FEIJOO, Edwin Francisco. Nueva tecnología: bomba recirculadora implementada en la optimización del sistema de bombeo electrosumergible en el pozo lobo 003, enero 2013. Trabajo de grado presentado para optar por el título de ingeniero en Petróleos, Quito, 2013.
- SILVA ARIAS, Cristhian Eladio. Desarrollo y manejo de información de pozos nuevos a perforar en el campo la Cira Infantas. Trabajo de grado presentado para optar por el título de Geólogo, Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, 2009.
- SUBPUMP, Análisis y diseño de bombas sumergibles Manual Técnico de referencia. IHS.
- TAKACS, Gabor. Electrical Submersible Pumps Manual. Design, operations and Maintenance. Gulf, Elsevier, USA, 2009, 425 pág.

- VÁSQUEZ LEAL, José Antonio. Evaluación del método de levantamiento artificial por bombeo electrosumergible para su aplicación en el área mayor de oficina del distrito gas Anaco. Trabajo de grado presentado para optar por el título de ingeniero en Petróleos, Universidad de Oriente, Barcelona, 2011.
- VERSA PUMP, Electric Submersible Pump, Product catalog 2013.
- UPME, COLCIENCIAS, Ahorro de energía en sistemas de bombas centrifugas.

ANEXOS

Anexo A. Programa computarizado NAVA

El programa computarizado NAVA para el diseño de sistemas de levantamiento artificial por bombeo electrosumergible es un software de fácil y rápida aplicación que permite realizar el diseño de un pozo o el seguimiento de uno o varios pozos con BES ya instalado, conociendo datos de producción, yacimiento, fluido, entre otros.

NAVA implementa un sistema experto orientado a facilitar la toma de decisiones en la manipulación del software. Uno de los aspectos importantes de este software es que cuenta con una amplia base de datos de bombas, más específicamente, 254 bombas de diversos fabricantes.

- **Instalación y ejecución del programa**

- **Requisitos Mínimos del Sistema**

- Sistema Operativo Windows 7/8/10 de 64 bits, procesador x64.
- Microsoft Excel no debe tener complementos instalados.
- Memoria Ram de 2 GB o superior.
- 1.5 GB de espacio libre en disco.

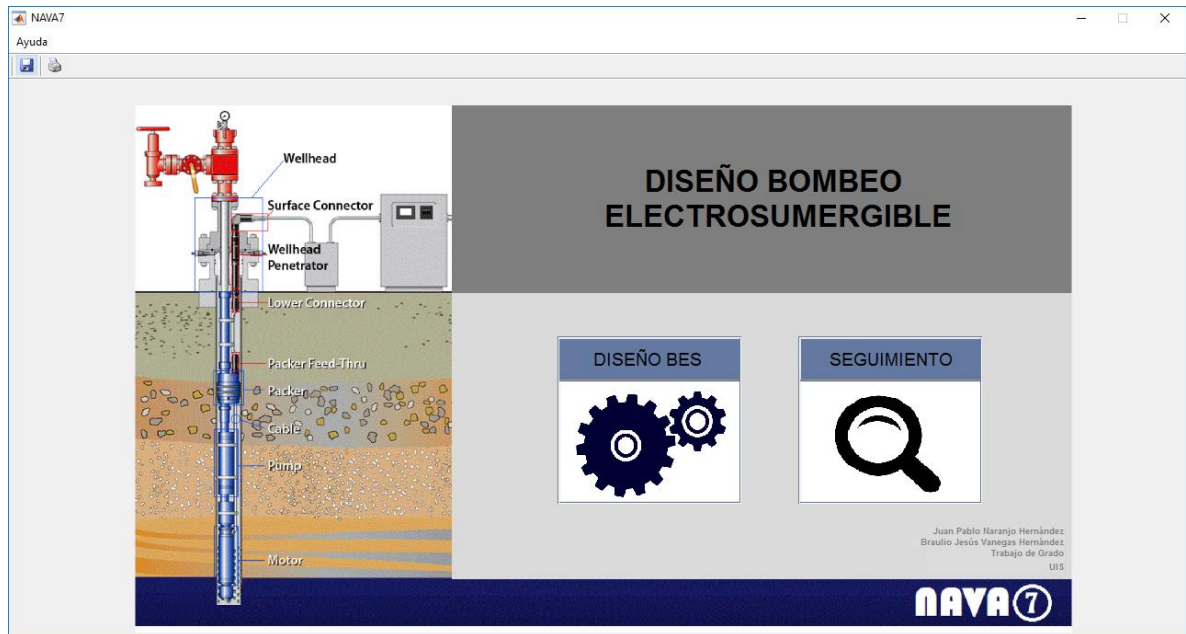
Al insertar el disco con el software NAVA aparecen una serie de archivos con el ejecutable y las bases de datos.

Para el funcionamiento del programa se debe instalar el archivo ***MCRInstaller*** ubicado en la carpeta mencionada, para ello, es necesario dar clic en la opción next y seguir los pasos de instalación. Una vez finalizada la instalación se debe dirigir nuevamente a la carpeta y allí se encuentra el archivo **NAVA.exe** el cual debe ejecutarse para tener acceso al uso del software.

- **Manual del usuario**

NAVA se encuentra dividido en dos opciones, Diseño BES y Seguimiento como se observa en la página principal.

Figura 41. Página principal NAVA.



- **Diseño BES**

Es necesario seguir correctamente las instrucciones de uso para garantizar el buen funcionamiento del programa. En cada una de las interfaces se recomienda llenar los datos y elegir las opciones de izquierda a derecha, ya que, el mal uso del software genera cuadros de dialogo con recomendaciones o errores.

- **Entrada de datos**

Una vez seleccionada la opción Diseño BES aparecerá una interfaz para el ingreso de los datos del pozo, condiciones del fluido del pozo y datos de producción.

Primeramente, se tiene el botón CARGAR EJEMPLO ubicado en la parte inferior izquierda, por medio del cual, se obtienen valores de entrada de un ejemplo propuesto, con el fin, de facilitar la ejecución y entendimiento del programa. Por otro lado, existe la opción LIMPIAR DATOS, al oprimirse dicho botón las casillas con los datos de entrada obtenidos de la opción CARGAR EJEMPLO se restauran volviendo todos los espacios a quedar vacíos.

Al momento que se desee ingresar datos de un nuevo pozo diferentes a los arrojados por el ejemplo es necesario llenar todos los datos solicitados por el software, para ello, se llenan los espacios que se encuentran en color blanco y seguidamente se oprime la opción VALIDAR DATOS, por medio de la cual se calcularán las variables ubicadas en los cuadros de color gris. Dar clic en siguiente.

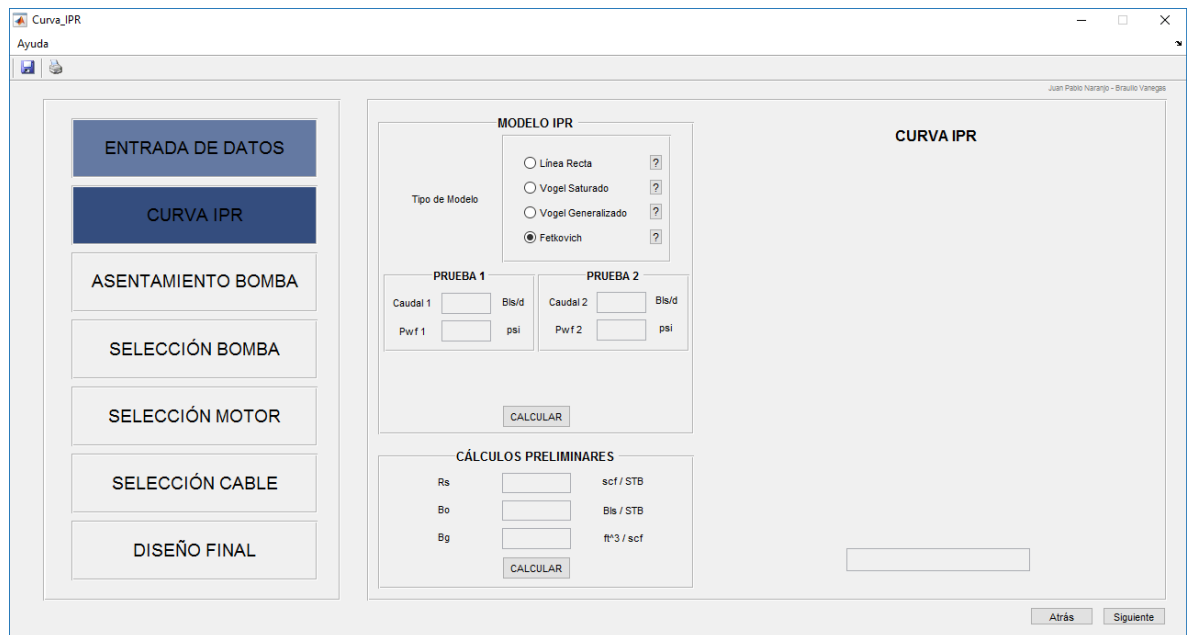
Figura 42. Entrada de datos – NAVA.

- **Curva IPR**

En ésta ventana se debe seleccionar el tipo de modelo IPR apropiado, seguidamente ingresar los valores de la(s) prueba(s) y oprimir el botón CALCULAR

ubicado en el recuadro MODELO IPR. Luego, oprimir el botón CALCULAR ubicado en el recuadro CÁLCULOS PRELIMINARES para obtener dichos cálculos. Dar clic en siguiente.

Figura 43. Curva IPR – NAVA.



- **Condiciones de Asentamiento de la Bomba**

Esta interfaz solo requiere de unos pocos datos (Figura 46), primeramente se debe seleccionar una de las dos opciones: Se conoce Caudal total y Presión de entrada bomba o Se conoce Caudal total y Profundidad bomba, posterior a esto llenar los dos espacios que se activan al elegir una de las dos opciones propuestas.

NAVA proporciona un acompañamiento para la selección de cualquiera de éstas tres variables mediante 3 opciones propuestas dentro del recuadro PARÁMETROS DE DISEÑO. Para usar dichas ayudas basta con oprimir el o los botón(es) (Conocer Q crítico por arenamiento, Conocer Q crítico por conificación y/o CALCULAR para conocer el nivel del pozo) y llenar los datos solicitados (Figuras 44 y 45).

Figura 44. Arenamiento – NAVA.

Figura 45. Conificación - NAVA.

Luego seleccionar el material de la tubería y oprimir el botón **CALCULAR** ubicado en el recuadro superior derecho.

Posteriormente, oprimir el botón CALCULAR ubicado en el recuadro CÁLCULOS GAS A LA ENTRADA DE LA BOMBA para conocer dichos cálculos. Finalmente, decidir si se desea instalar un separador de gas, para ello, NAVA muestra la eficiencia de separación natural de gas para facilitar ésta decisión. Dar clic en siguiente.

Figura 46. Asentamiento Bomba – NAVA.

- **Selección de la Bomba**

En primera instancia seleccionar la frecuencia de la bomba, seguidamente se puede realizar corrección por tipo de emulsión (Figura 49) y/o por viscosidad si el usuario lo desea, además NAVA tiene una opción para mostrar la curva de oferta y demanda del pozo (Figura 48).

Seguidamente oprimir el botón CALCULAR ubicado en el recuadro DATOS DEL SISTEMA, el cuál mostrará dichos cálculos y filtrará las bombas que se ajustan al diseño que se esté realizando. Luego insertar el número de la fila de la bomba seleccionada y oprimir el botón CALCULAR. Dar clic en siguiente.

Figura 47. Selección Bomba – NAVA.

Figura 48. Curva oferta y demanda del pozo – NAVA.

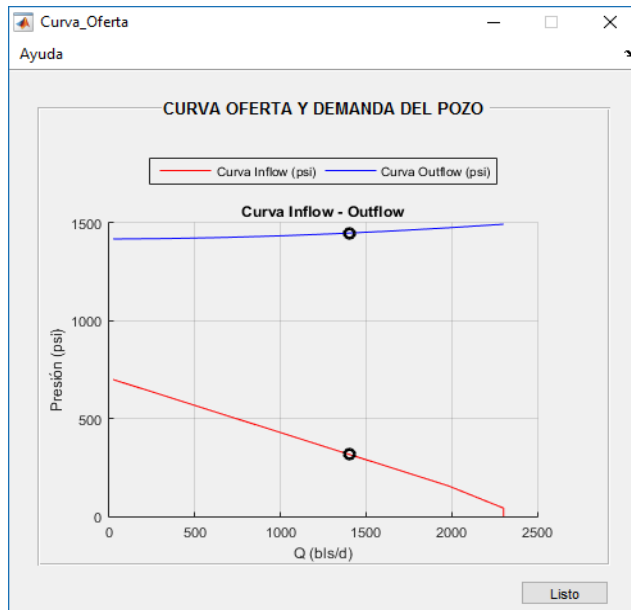


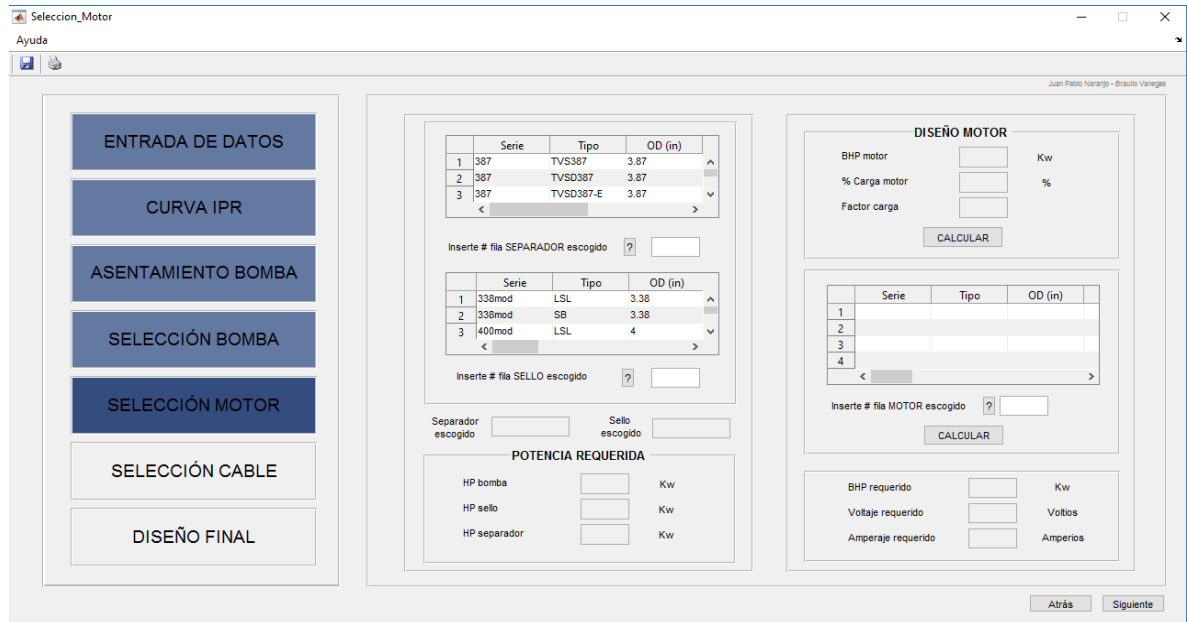
Figura 49. Emulsión – NAVA.

- **Selección separador, sello y motor**

Para la selección del separador y del sello es necesario ingresar el número de la fila del componente escogido en cada tabla.

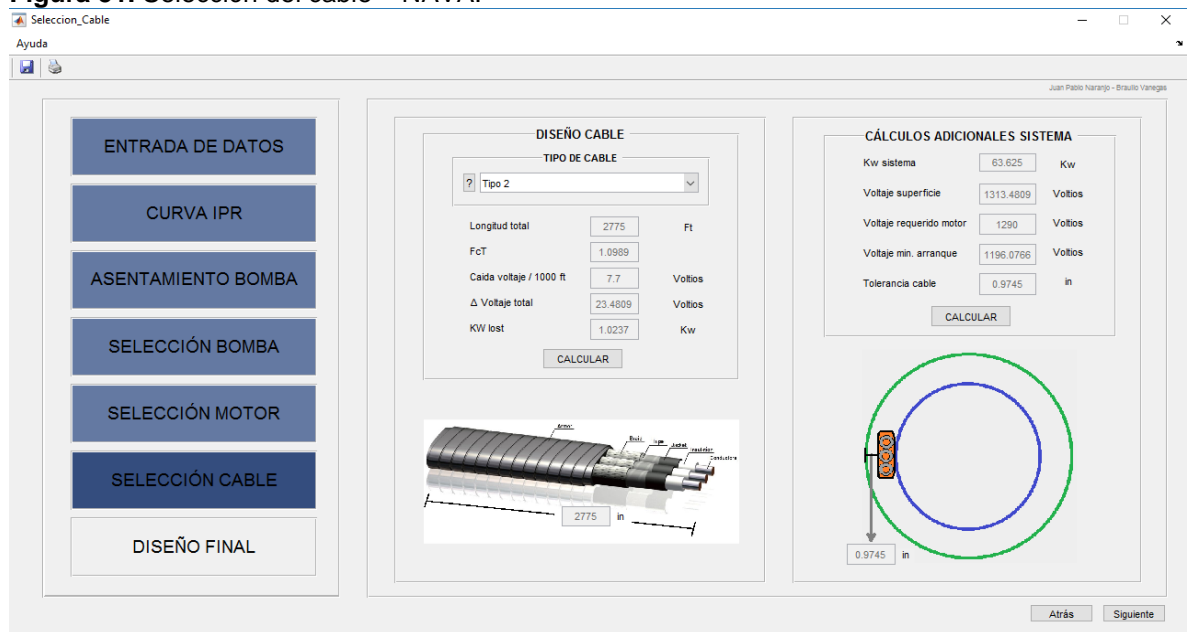
Luego, oprimir el botón CALCULAR ubicado en el recuadro DISEÑO MOTOR, el cual habilitará la tabla de motores. Posteriormente ingresar el número de la fila del motor seleccionado y oprimir el botón CALCULAR. Dar clic en siguiente.

Figura 50. Selección del motor – NAVA.



- Selección del cable

Figura 51. Selección del cable – NAVA.



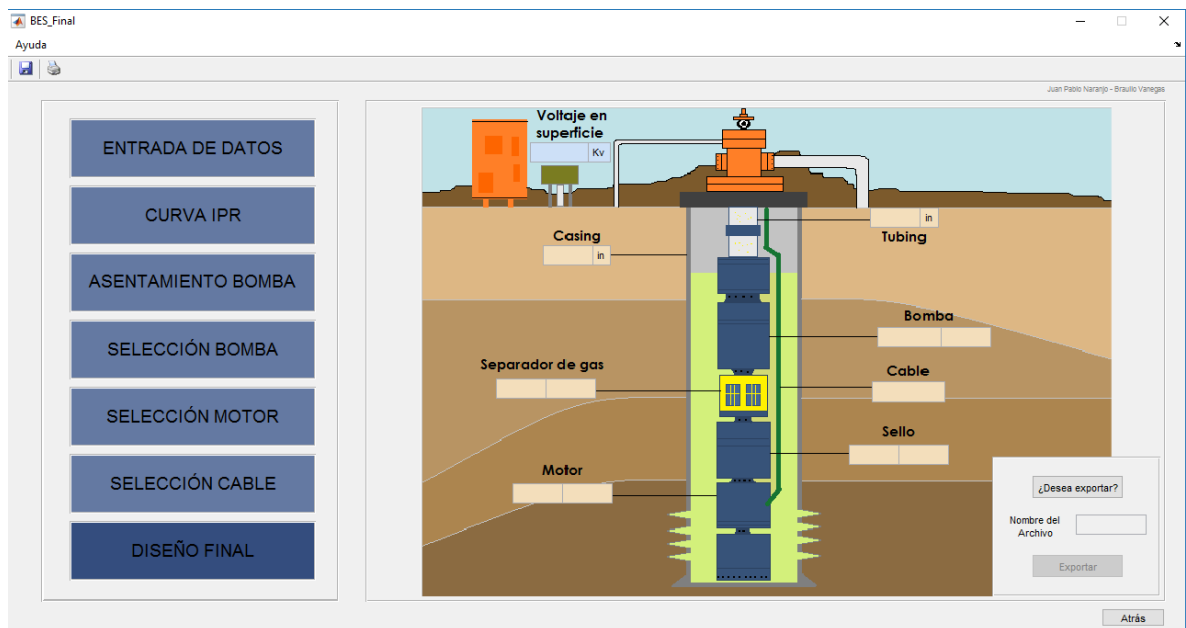
Seleccionar el tipo de cable y oprimir el botón CALCULAR ubicado en el recuadro DISEÑO CABLE. Posteriormente, oprimir el botón CALCULAR ubicado en el recuadro CÁLCULOS ADICIONALES SISTEMA para realizar dichos cálculos. Dar clic en siguiente.

- **Resultados del diseño BES**

En la última interfaz se puede observar el diseño elegido en el programa NAVA, mostrando los tipos de accesorios más representativos elegidos en el diseño de un sistema de levantamiento por bombeo electrosumergible. Adicionalmente se presenta la opción de exportar los datos del diseño elegido, para esto, dirigirse al botón *¿Desea exportar?*, dar clic allí, seguidamente ingresar el nombre del archivo que se desee colocar y finalmente dar clic en el botón *Exportar*.

Tener presente que el proceso de exportar los datos se demora unos cuantos segundos, por ende, es importante esperar hasta que el botón *Exportar* y la casilla de *Nombre del Archivo* se deshabiliten. Se exporta un archivo tipo Excel (.xlsx) el cual se guarda en la carpeta donde se encuentra ubicado el ejecutable del software.

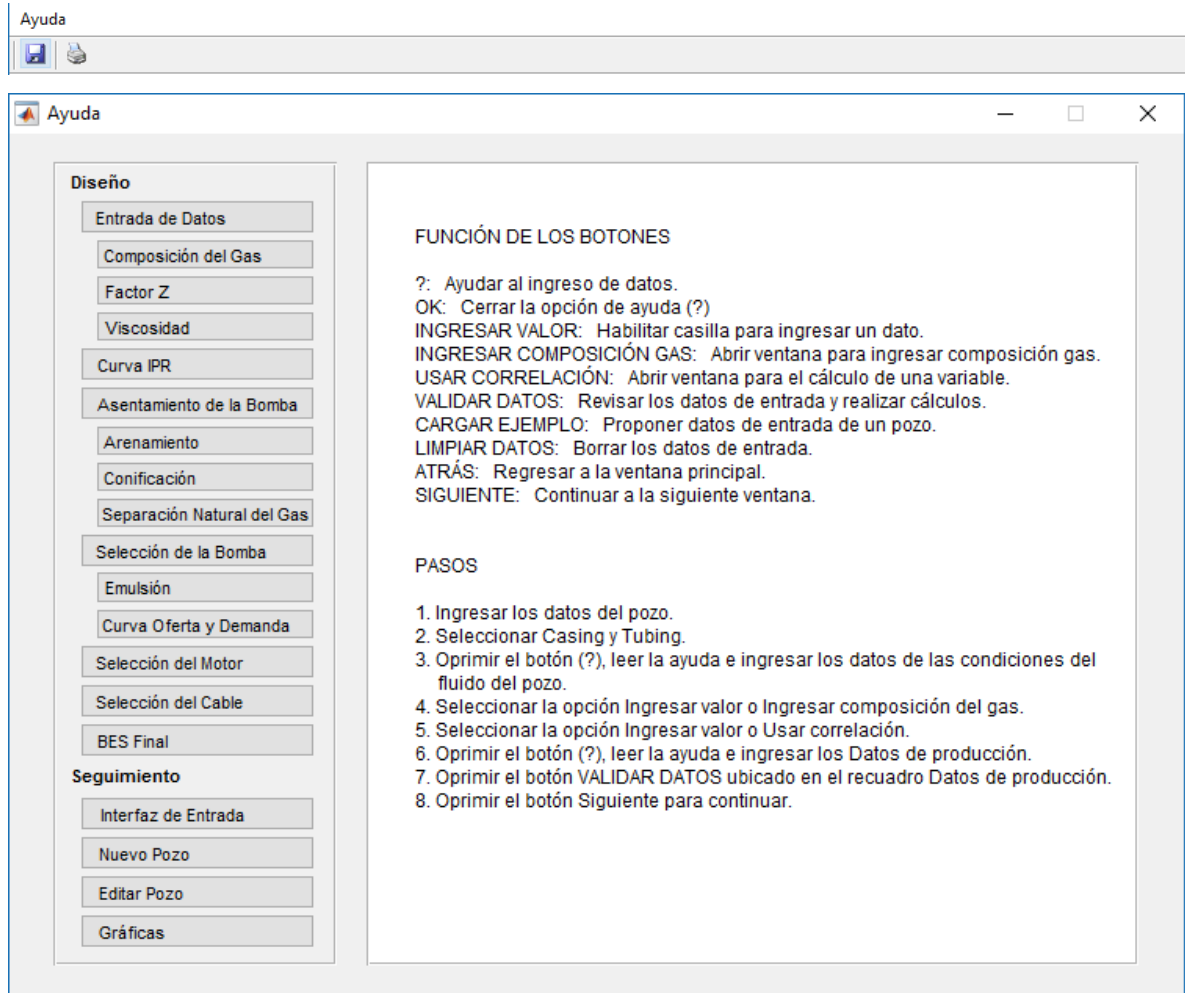
Figura 52. BES final – NAVA.



- **Ayuda**

En cada una de las interfaces con las que cuenta NAVA se propone un botón de ayuda ubicado en la parte izquierda superior el cual abre una interfaz, en la que, el usuario puede informarse del uso del software (Figura 53). Además, NAVA propone otras ayudas a medida que se realiza el diseño mediante un botón (?), el cual habilita un cuadro de dialogo que sirve de acompañamiento.

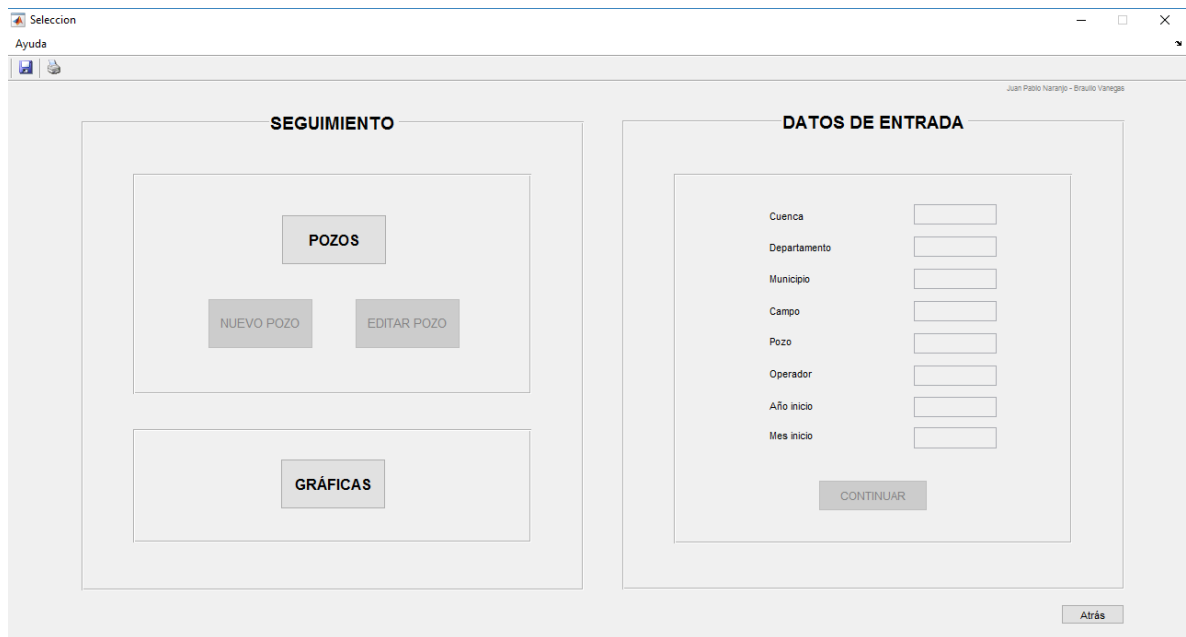
Figura 53. Ayuda – NAVA.



➤ Seguimiento

Al ingresar a la sección de seguimiento se abre una interfaz (Figura 54) donde se pueden optar por hacer tres funciones, las cuales componen el programa de seguimiento. Estas son NUEVO POZO, EDITAR POZO y GRÁFICAS.

Figura 54. Interfaz Seguimiento – NAVA.

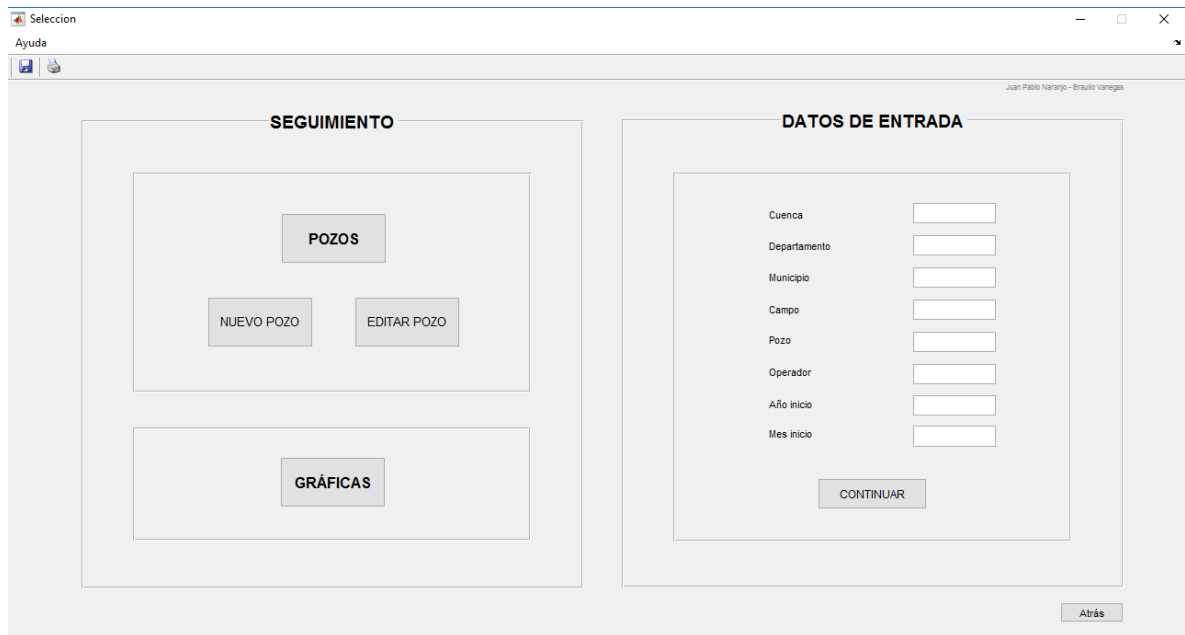


La primera consiste en añadir un nuevo pozo a la base de datos del programa. Para esto se sigue las opciones POZOS / NUEVO POZO, con esto se habilita la parte derecha de la interfaz (Figura 55), en donde se guardan datos básicos del pozo como Cuenca, Departamento, Municipio, Campo, Pozo, Operador, Año y Mes de inicio de la implementación del sistema BES.

El usuario debe tener en cuenta que los datos Año y Mes son datos estrictamente numéricos, de otra manera se ocasionaría un fallo del programa.

Después de introducir los datos del pozo y al oprimir continuar se añade este pozo automáticamente a la base de datos del programa.

Figura 55. Interfaz nuevo pozo – NAVA.



Entonces se abre la interfaz para añadir los datos mensuales de producción del pozo (Figura 56) Q producido, la presión de casing y tubing, PIP, temperatura del motor, GOR, BSW, la producción de arena y frecuencia bomba. El botón INSERTAR añade una nueva fila, es decir permite entrar los datos del siguiente mes.

El botón CALCULAR realiza las operaciones para hallar las demás variables mensuales. No es necesario calcular las variables cada vez que se añade una nueva fila a la tabla, se pueden añadir los valores y al final se calcularán todas las variables de cada fila. Notar que los valores promedio se actualizan cada vez que se oprime el botón CALCULAR.

Al terminar de insertar los datos de este campo, se requiere oprimir el botón GUARDAR para que los datos se archiven en la base de datos del pozo; de lo contrario la base de datos del pozo quedará vacía. Notar que, si se oprime más de una vez la opción GUARDAR, los datos se sobrescriben, es decir, se pueden modificar filas, pero no eliminar.

La opción EXPORTAR es opcional. Esta exportará los datos de la tabla a un archivo Excel que se llamará *EXPORT'n'*, donde *n* es el número de veces que se oprime la opción exportar mientras está abierto el programa, independientemente si se exportan los datos del mismo pozo más de una vez. Se recomienda al terminar el uso del software ir a la carpeta del programa y copiar los archivos exportados, de lo contrario en un posterior ingreso al programa los archivos se reescribirán al oprimir esta opción.

Para añadir nuevos pozos a la base de datos después de haber guardado la información con la opción GUARDAR, se puede seguir el link Atrás, y volver a repetir el proceso.

NAVA como aporte a los datos para el análisis en el proceso de seguimiento decide implementar dos índices. El índice NAVA de arena y el índice NAVA de gas. Donde se escogen estas variables debido a su gran impacto en el desarrollo eficiente del sistema BES en el pozo.

Figura 56. Interfaz ingreso de datos nuevo pozo – NAVA.

Ingresar datos																	
Año	Mes	Q (Bls/d)	Ptbg (psi)	Pcsq (psi)	PIP (psi)	Tmotor (°F)	GOR (scf/bls)	BSW (%)	Arena (ppm)	Frecuencia (Hz)	% Gas	Qo (bls/d)	Qw (bls/d)	Qg (Mscfd)	FcT	Ind Nava arena	Ind Nava gas
1	2011	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Promedio PIP psi Promedio % Gas % Promedio Tmotor °F
 Promedio Producción de Arena ppm Promedio Pcsq psi Promedio Índice de Arena
 Promedio BSW % Promedio Ptbg psi Promedio Índice de Gas

Un porcentaje de gas libre en la bomba mayor al 10-15% disminuye la eficiencia, además de producir efectos de cavitación y desgaste en la bomba, amenazando la integridad de la misma. Un efecto similar tiene una producción de arena mayor a 200 ppm.

El índice NAVA gas se define como:

$$\text{NAVA}_{\text{gas}} = \frac{15 - \% \text{GAS}}{15} * 100$$

Ecuación 95

El índice NAVA arena se define como:

$$\text{NAVA}_{\text{arena}} = \frac{200 - \text{Arena (ppm)}}{200} * 100$$

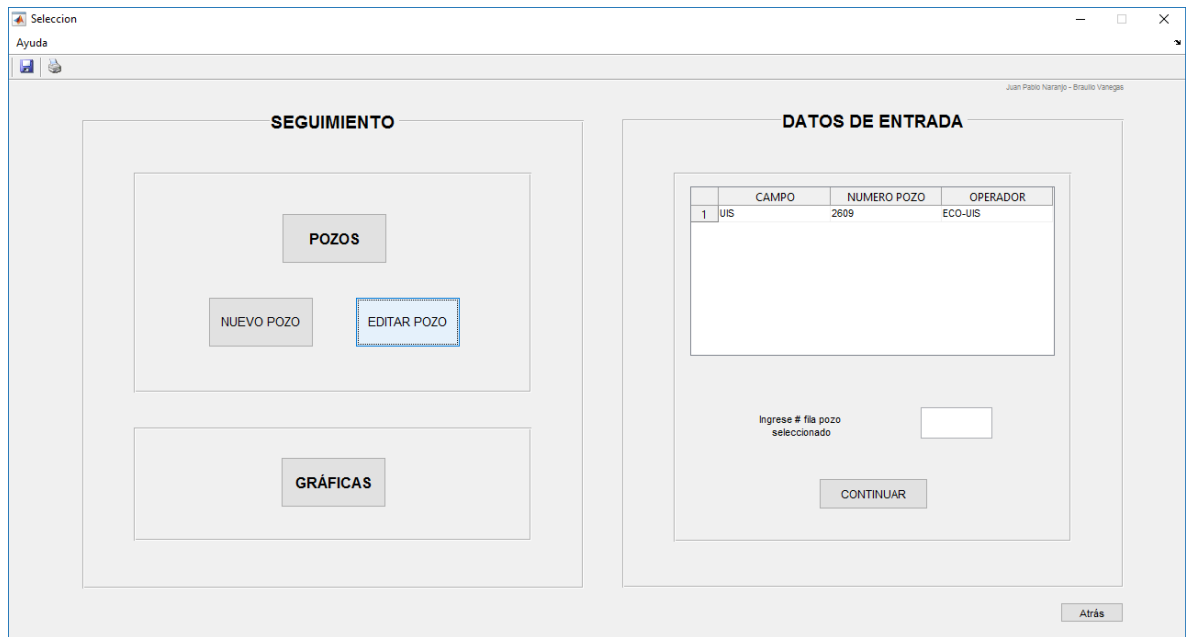
Ecuación 96

Notar que al ser más positivos los índices, las condiciones de desarrollo para el sistema BES son más favorables, teniendo un máximo de los índices de 100.

Por otro lado, un valor negativo de los índices indica condiciones desfavorables para el proceso de bombeo por BES, aumentando la desfavorabilidad entre más negativos sean los índices; teniendo un mínimo de favorabilidad para un valor NAVAgas de -566.66, mientras que el NAVAarena no presenta un límite inferior.

La otra opción que compone el programa de seguimiento es EDITAR POZO (Figura 57). Para esto se sigue las opciones POZOS / EDITAR POZO, con esto se habilita la parte derecha de la interfaz, en donde se muestra una tabla con los datos de CAMPO, NUMERO DE POZO y OPERADOR de la base datos que se implementó con la opción NUEVO POZO. Esta opción permite editar los valores de producción del pozo seleccionado, donde nuevamente se pueden editar las filas y añadir nuevas, pero no eliminar.

Figura 57. Interfaz editar pozo – NAVA.

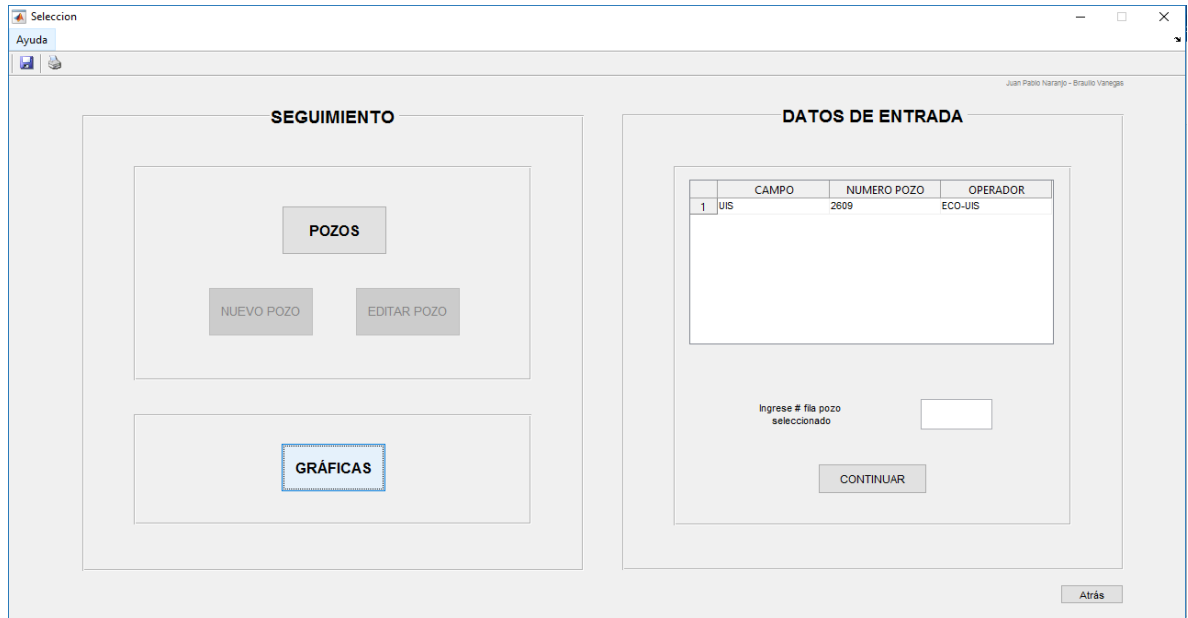


La interfaz para esta operación es la misma que en NUEVO POZO y los links cumplen las mismas funciones; la diferencia está en que con la opción EDITAR POZO se carga la base de datos del pozo seleccionado para editar. Para hacer esto se escribe el número de fila del pozo elegido en la casilla y se oprime CONTINUAR.

Al igual que en la opción NUEVO POZO, EDITAR POZO permite exportar la información contenida en la tabla a editar, la opción EXPORTAR permite realizar esta acción (Figura 56). El archivo exportado se llamará *EDITEXPORT'n'*, donde *n* es el número de veces que se oprime la opción exportar mientras está abierto el programa, independientemente si se exportan los datos del mismo pozo más de una vez. Se recomienda al terminar el uso del software ir a la carpeta del programa y copiar los archivos exportados, de lo contrario en un posterior ingreso al programa los archivos se reescribirán al oprimir esta opción.

La tercera opción del programa es la encargada de proporcionar la interfaz y consejos para hacer los análisis de los datos de seguimiento del pozo con sistema BES (Figura 58).

Figura 58. Interfaz selección gráficas – NAVA.

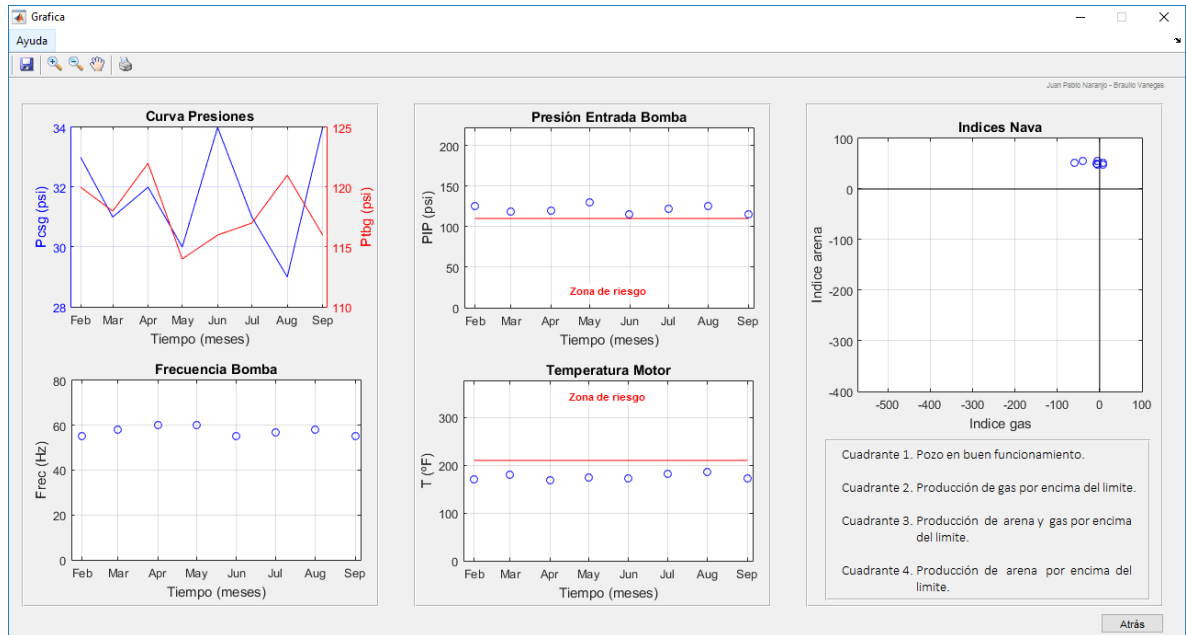


Para esto seguimos el link GRÁFICAS, el cual habilitará a la parte derecha una tabla donde mostrará los pozos existentes en la base de datos, con la información CAMPO, NUMERO DE POZO Y OPERADOR. Mediante la opción insertar el número de fila del pozo al cual se quiere analizar y la acción de CONTINUAR, el programa se dirigirá a la interfaz de GRÁFICAS.

La interfaz de GRÁFICAS mostrará la información de los datos de producción del pozo resumida en cinco gráficas (Figura 59). La primera gráfica muestra el comportamiento de la presión del casing y del tubing mensualmente. La segunda muestra el comportamiento de la frecuencia de la bomba. La tercera gráfica muestra el comportamiento de la presión a la entrada de la bomba, la cual no debe ser inferior a 110 psi, observándose una zona de riesgo por debajo de éste valor.

Por otro lado, en la gráfica cuatro se representa el comportamiento de la temperatura del motor la cual no debe ser superior a 210 °F, debido a que estaría en riesgo el daño del motor, además en la gráfica, por encima de 210 °F se observa una zona de riesgo.

Figura 59. Interfaz gráficas – NAVA.



La quinta gráfica es la gráfica implementada por NAVA. Esta gráfica se aconseja analizar mensualmente por pozo, y correlacionarla con la base de datos del pozo (a la cual se puede acceder mediante la opción EDITAR POZO).

La gráfica de índices NAVA muestra los puntos intercepción mensuales entre el índice NAVAarena y NAVAgas, la densidad de puntos por cuadrante me indica la situación del sistema BES respecto a cuestiones de producción de arena y gas, advirtiendo sobre el hecho de la posible necesidad de implementar medidas para mejorar la eficiencia del sistema y proteger su integridad.

Según los índices NAVA y en cuanto a producción de arena y gas, se tiene que el cuadrante:

1. Pozo en buen funcionamiento. Se aconseja seguir implementando el seguimiento previendo posibles cambios y así actuar rápida y eficazmente.

2. Producción de gas por encima del límite. Evidencia la necesidad de instalar un separador de fondo, o si éste ya fue instalado entonces se muestra un mal funcionamiento del mismo, probablemente por cuestiones de diseño o integridad del separador; se requieren medidas para contrarrestar este hecho.
3. Producción de arena y gas por encima del límite. Se tienen las mismas consideraciones del cuadrante dos junto con el cuadrante cuatro. Es el peor de los casos que se podría tener.
4. Producción de arena por encima del límite. Este efecto se debe a la geomecánica del pozo, se aconseja implementar un liner ranurado o un empaquetamiento con grava, y así, tanto mejorar la eficiencia del sistema BES como proteger su integridad y la del pozo.