

**COMPARACIÓN Y DISEÑO DE UNIDADES CONVENCIONALES Y NO
CONVENCIONALES DE BOMBEO MECÁNICO. APLICACIÓN A
CAMPOS COLOMBIANOS**

**DANNIELA SÁNCHEZ SERRANO
IVONNE MARIELA CATHERINE SUÁREZ GARCÍA**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO QUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA DE PETRÓLEOS
BUCARAMANGA
2018**

**COMPARACIÓN Y DISEÑO DE UNIDADES DE BOMBEO MECÁNICO
CONVENCIONALES Y NO CONVENCIONALES. APLICACIÓN A CAMPOS
COLOMBIANOS**

**DANNIELA SÁNCHEZ SERRANO
IVONNE MARIELA CATHERINE SUÁREZ GARCÍA**

**Trabajo de grado como requisito para optar al título de Ingeniero de
Petróleos**

**Director:
M.Sc. Erik Giovany Montes Páez
Ingeniero de Petróleos**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO QUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA DE PETRÓLEOS
BUCARAMANGA
2018**

DEDICATORIA

A Dios quien me otorgó salud y resiliencia para poder cumplir mis metas y objetivos planteados hasta el presente.

A mis padres Maritza Sofía Serrano y Ludwing Sánchez Carrillo por sus enseñanzas, comprensión, sacrificio, apoyo y amor incondicional, quienes son mi inspiración y fuerza para seguir luchando por mis sueños.

A mi nona (+), por tanto, por haber estado siempre para mí y más importante por siempre haber creído y estar orgullosa de mí.

A toda mi familia, que siempre quieren lo mejor para mí y con sus consejos y apoyo han sido parte importante en la realización de esta meta; así mismo a Nicky y Puppy (+) por estar siempre ahí conmigo brindándome su amor y compañía canina.

A mis Amigos y colegas petroleros que estuvieron junto a mí en todo este camino e hicieron más fácil y divertido el paso por la universidad, en especial Yor, Iván, Ivonne y Delfín; mis amigas de inglés por las innumerables risas y carcajadas y su excelente compañía, y que en más que amigas de un salón de clase se convirtieron en amigas de la vida; y así mismo a mis amigos de toda la vida que siempre han estado incondicionalmente junto a mí.

A Omar Álvarez y al Teatro UIS por las incalculables enseñanzas y ser el complemento perfecto en mi vida universitaria y profesional.

A mis Panditas por tantas locuras, choco aventuras y momentos lindos vividos.

A mi compañera de proyecto, por tenerme tanta paciencia y comprensión.

Danniela

DEDICATORIA

A Dios por haberme permitido vivir esta gran experiencia, aprender de ella y crecer personal y profesionalmente durante mi vida universitaria.

A mi madre, mi heroína, mi ejemplo, mi apoyo, mi fortaleza. La que siempre ha estado allí para apoyarme y animarme cuando me faltan fuerzas.

A mi hermano, mi niño pequeño, ahora más alto que yo, quién me motiva a salir adelante y ser una mejor persona para darle un buen ejemplo.

A mi tía y mi familia, quienes me hicieron sentir acogida y protegida, ya que sin su ayuda no habría sido posible para mí desarrollar una carrera universitaria.

A mis primos que han sido como hermanos para mí, me han aconsejado y apoyado. A sus hijos quienes me han dado muchas alegrías, momentos divertidos y me han brindado todo su cariño.

A mis amigos quienes me acompañaron a cada paso, me animaron cuando sentí que mis fuerzas desfallecían y vivieron conmigo mil aventuras, llenando así mi memoria de gratos recuerdos.

A Danniela quién fue mi compañera en este proyecto. Gracias por vivir esta aventura conmigo, animarme y soportarme.

A todas aquellas personas que de una u otra manera influyeron en esta experiencia haciéndola más grata y sencilla para mí.

Ivonne

AGRADECIMIENTOS

Los Autores expresan sus agradecimientos a:

A nuestras familias por su apoyo en todos estos años.

Al ingeniero Erik Montes por su confianza, humor, atención y orientación profesional en el desarrollo de este trabajo de grado.

A la Universidad Industrial de Santander, la escuela de Ingeniería de Petróleos y todo su cuerpo docente por la formación recibida a lo largo de estos años.

A nuestros compañeros de carrera, por su compañía y amistad durante toda la carrera.

A doña Vicky, por todas sus atenciones.

A Coldplay y demás artistas, por ambientarnos y amenizar la realización de este trabajo.

A los diferentes expertos, por su apoyo para que este proyecto saliera adelante.

A todos los que de una u otra forma hicieron su aporte en la realización de este libro, y que en este momento escapan de nuestra memoria.

TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	17
1. BOMBEO MECÁNICO	18
1.1. UNIDADES CONVENCIONALES DE BOMBEO MECÁNICO	18
1.1.1. Balancín.....	18
1.1.2. Aerobalanceada.....	19
1.1.3. Mark II.....	20
1.2. UNIDADES NO CONVENCIONALES DE BOMBEO MECÁNICO	22
1.2.1. Reverse Mark (RM).....	22
1.2.2. Unidad de bombeo de bajo perfil.	23
1.2.3. Morlift.	23
1.2.4. Corlift.	25
1.2.5. Rotaflex.....	27
1.2.6. Dynapump.	28
1.2.7. VSH2.	29
1.2.8. Linear Rod Pump.....	30
1.2.9. Crank Rod Pump.	31
1.2.10. MaxiStroke.....	32
2. GUÍA DE SELECCIÓN DE UNIDADES DE BOMBEO MECÁNICO	34
2.1. METODOLOGÍA DE LOS ESCENARIOS.....	34
2.1.1. Análisis Estructural.	35
2.2. RANGOS DE APLICACIÓN DE LAS VARIABLES CLAVES DEL SISTEMA.....	42
2.2.1. Balancín.....	43
2.2.2. Aerobalanceada.....	44
2.2.3. Beam Balance Pump.	44
2.2.4. Mark II.....	45
2.2.5. Reverse Mark (RM).....	45
2.2.6. Unidad de bombeo de bajo perfil.	46
2.2.7. Rotaflex.....	46
2.2.8. Morlift.	47

2.2.9	Corlift.	47
2.2.10	Dynapump.	48
2.2.11	VSH2.	48
2.2.12	Linear Rod Pump.	49
2.2.13	Crank Rod Pump.	49
2.2.14	MaxiStroke.	50
3.	METODOLOGÍA DE SELECCIÓN.	51
3.1	INFORMACIÓN REQUERIDA.	51
3.2	EVALUACIÓN CUANTITATIVA DE LAS UNIDADES DE BOMBEO MECÁNICO.	53
3.3	PORCENTAJES DE LAS VARIABLES DE EVALUACIÓN.	54
3.4	PONDERACIÓN Y SELECCIÓN DE LAS UNIDADES DE BOMBEO MECÁNICO MÁS APROPIADAS.	55
3.5	PRESENTACIÓN DE LOS RESULTADOS.	55
4.	PROGRAMA EN EXCEL.	57
4.1	DATOS DE ENTRADA.	57
4.1.1.	Información requerida.	57
4.1.2.	Ingreso de datos.	62
4.2	EVALUACIÓN Y SELECCIÓN DE LA UBM.	62
4.3	RECURSOS ADICIONALES.	64
4.3.1	Información sobre las Unidades.	64
4.3.2	Manual de usuario.	64
5.	APLICACIÓN DE LA GUÍA DE SELECCIÓN.	65
5.1	SELECCIÓN DE POZOS.	65
5.2	DISEÑO DE LAS UNIDADES.	65
5.3	ANÁLISIS DE RESULTADOS.	79
6.	CONCLUSIONES.	82
7.	RECOMENDACIONES.	84
	BIBLIOGRAFÍA.	85
	ANEXOS.	87

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Balancín Convencional	19
Figura 2. Unidad Balanceada por aire.....	20
Figura 3. Unidad Mark II.....	21
Figura 4. Unidad Reverse Mark	22
Figura 5. Unidad de bombeo de bajo perfil	23
Figura 6. Unidad de Bombeo Morlift.....	25
Figura 7. Unidad de bombeo Corlift	26
Figura 8. Unidades Rotaflex.....	28
Figura 9. Unidad Dynapump	29
Figura 10. Unidad VSH2	29
Figura 11. Unidad Linear Rod Pump.....	31
Figura 12. Unidad Maxistroke	33
Figura 13. Gráfica Motricidad Vs Dependencia.....	40
Figura 14. Clasificación de las variables que afectan el sistema en cuatro zonas	41
Figura 15. Variables usadas para la selección de UBM.....	51
Figura 16. Tabla de datos Balancín	53
Figura 17. Fragmento de Matriz “TCT”	54
Figura 18. Interfaz de usuario, Variables de Diseño	59
Figura 19. Interfaz de usuario, Características de Fluido y Facilidades de Superficie.....	61
Figura 20. Interfaz de usuario, Botón “Resultados	62
Figura 21. Interfaz de usuario, Matriz “Resultados”	63
Figura 22. Resultados Pozo1	66
Figura 23. Resultado Pozo 2.....	67
Figura 24. Resultados Pozo 3.....	67
Figura 25. Resultados Pozo 4.....	68

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Variables que influyen sobre el sistema	36
Tabla 2. Código de diligenciamiento de la matriz estructural	37
Tabla 3. Rangos de aplicación de las variables clave para balancín.....	43
Tabla 4. Rangos de aplicación de las variables clave para la Unidad Aerobalanceada.....	44
Tabla 5. Rangos de aplicación de las variables clave para la Unidad Beam Balance.....	44
Tabla 6. Rangos de aplicación de las variables clave para la Unidad Mark II	45
Tabla 7. Rangos de aplicación de las variables clave para la Unidad Reverse Mark	45
Tabla 8. Rangos de aplicación de las variables clave para la Unidad de Bajo Perfil	46
Tabla 9. Rangos de aplicación de las variables clave para la Unidad Rotaflex.....	46
Tabla 10. Rangos de aplicación de las variables clave para la Unidad Morlift	47
Tabla 11. Rangos de aplicación de las variables clave para la Corlift	47
Tabla 12. Rangos de aplicación de las variables clave para la Unidad Dynapump	48
Tabla 13. Rangos de aplicación de las variables clave para la Unidad VSH2.....	48
Tabla 14. Rangos de aplicación de las variables clave para la Unidad LRP	49
Tabla 15. Rangos de aplicación de las variables clave para la Unidad CRP	49
Tabla 16. Rangos de aplicación de las variables clave para la Unidad MaxiStroke	50
Tabla 17. Valores numéricos de los rangos cualitativos.....	53
Tabla 18. Puntuación y porcentaje de las variables de evaluación	55
Tabla 19. Matriz “Resultados”.....	56
Tabla 20. Información de pozos	66
Tabla 21. Datos más importantes de las varillas API de diferentes tamaños	70

Tabla 22. Constantes elásticas y otros datos básicos tuberías API de diferentes tamaños	71
Tabla 23. Datos de entrada, pozo 2, para correr el Qrod	74
Tabla 24. Comparación de los caudales obtenidos por las unidades a diferentes velocidades de bombeo	75
Tabla 25. Resultados de las corridas realizadas en el Qrod	75
Tabla 26. Eficiencia Mecánica de las unidades de bombeo mecánico	76
Tabla 27. Potencia que entra a cada unidad proveniente del motor	77
Tabla 28. Potencia que entra a la unidad proveniente del motor	77
Tabla 29. Potencia que entra a la unidad proveniente del motor	78
Tabla 30. Eficiencia del sistema con cada unidad	78
Tabla 31. Resultados Pozo 1	79
Tabla 32. Resultados Pozo 2	79
Tabla 33. Resultados Pozo 3	80
Tabla 34. Resultados Pozo 4	80

LISTA DE ANEXOS

(Ver anexos L, M Y N adjuntos en el CD y pueden visualizarlos en la Base de Datos de la Biblioteca UIS)

	Pág.
ANEXO A. Metodología API R11L para el pozo 2	87
ANEXO B. Cartas de las variables independientes y dependientes para el diseño de las unidades de bombeo	91
ANEXO C. Tablas para las varillas API.	98
ANEXO D. Resultados Qrod para los diferentes pozos.....	104
ANEXO E. Ecuaciones y parámetros de diseño para una Unidad ROTAFLEX...119	
ANEXO F. Esquema General de la Metodología de Selección.	121
ANEXO G. Presentación de la interfaz y solicitud de datos.....	122
ANEXO H. Ponderación de las unidades de Bombeo Mecánico.	123
ANEXO I. Llenado de la matriz TCT[8,56]:	124
ANEXO J. Diseño del sistema de bombeo de una unidad Rotaflex.	125
ANEXO K. Cálculo del torque y factores de torque, carga y torque netos.....	126
ANEXO L. Manual de Usuario UBM 1.0	
ANEXO M. Programa en Excel desarrollado (UBM 1.0)	
ANEXO N. Resumen Unidades de Bombeo Mecánico	

RESUMEN

TÍTULO: COMPARACIÓN Y DISEÑO DE UNIDADES DE BOMBEO MECÁNICO CONVENCIONALES Y NO CONVENCIONALES. APLICACIÓN A CAMPOS COLOMBIANOS*.

LOS AUTORES: DANNIELA SÁNCHEZ SERRANO
IVONNE MARIELA CATHERINE SUÁREZ GARCÍA**

PALABRAS CLAVE: Levantamiento Artificial, Bombeo Mecánico, Unidad de Bombeo, Unidades Convencionales, Unidades No Convencionales, Diseño, Campos Petroleros.

DESCRIPCIÓN:

El bombeo mecánico es el Método de Producción más antiguo y popular de la industria petrolera. La evolución de los componentes de la unidad de bombeo mecánico, tanto en diseño como en materiales, la tecnología electrónica y el avance en las aplicaciones de análisis y diseño, han contribuido para que el bombeo mecánico convencional moderno se consolide como uno de los Sistemas de Levantamiento Artificial más versátiles y eficientes.

Sin embargo, para lograr una mayor productividad del pozo, que la unidad de bombeo alcance su máxima eficiencia y su vida útil sea mayor, y evitar costos adicionales, es necesario seleccionar la unidad más adecuada para cada pozo específico. Para lograrlo hay que conocer las características y desempeño de las unidades que fueron consideradas en este trabajo de investigación.

Con el propósito de facilitar el proceso de selección de la unidad, en este proyecto trabajo de grado, se identifican las unidades de bombeo mecánico, tanto convencionales como no convencionales, y se desarrolla una guía de selección teniendo en cuenta las especificaciones de cada unidad, con el fin de elegir la más adecuada para un caso determinado, de una manera más acertada y simple. Además, se usa dicha guía de selección en varios pozos de campos petroleros colombianos para escoger las unidades de bombeo más apropiadas en cada uno y diseñarlas.

*Trabajo de Grado

**Facultad de Ingenierías Físico-Químicas. Escuela de Ingeniería de Petróleos. Director: Erik Giovany Montes Paez, Ingeniero de Petróleos

ABSTRACT

TITLE: COMPARISON AND DESIGN OF CONVENTIONAL AND NON-CONVENTIONAL ROD PUMPING UNITS. APPLICATION TO COLOMBIAN FIELDS*.

AUTHORS: DANNIELA SÁNCHEZ SERRANO
IVONNE MARIELA CATHERINE SUÁREZ GARCÍA**

KEY WORDS: Artificial Lift, Rod Pumping, Pumping Unit, Conventional Units, Unconventional Units, Design, Oil Fields.

DESCRIPTION

Rod pumping is the oldest and most popular production method in the oil industry. The evolution of the components of the Rod pumping unit, both in design and in materials, electronic technology and advances in analysis applications and design, have contributed to the modern Rod pumping conventional being consolidated as one of the more versatile and efficient Artificial Lifting Systems.

However, to achieve a higher productivity of the well, the pumping unit reaches its maximum efficiency and its useful life would be greater, and to avoid additional costs, it is necessary to select the most suitable unit for each specific well. In order to get this, is necessary to know the characteristics and performance of the units that were considered in this research.

To facilitate the selection process of the unit, in this research project, the Rod pumping units, both conventional and unconventional, are identified, and a selection guide is developed considering the specifications of each unit, with the purpose to choose the most appropriate for a given case, in a more accurate and a simple way. In addition, this selection guide is used in several wells of Colombian oil fields to choose the most appropriate pumping units in each one and design them.

*Bachelor Thesis

**Facultad de Ingenierías Físico-Químicas. Escuela de Ingeniería de Petróleos. Director: Erik Giovany Montes Paez, Ingeniero de Petróleos

INTRODUCCIÓN

Actualmente el bombeo mecánico es el sistema de levantamiento artificial usado en aproximadamente 80% de los pozos del mundo. A pesar de que este sistema es ampliamente utilizado debido a sus diversas ventajas, se debe tener en cuenta que con el cambio de algunas condiciones operacionales y/o características de la unidad tradicional, se podría conseguir un mejor desempeño del sistema de levantamiento incrementando así su eficiencia. Este es el caso de las unidades no convencionales.

En el presente estudio se identificaron los parámetros operacionales y demás variables que influyen en el desempeño de las unidades de bombeo mecánico, convencionales y no convencionales, que fueron analizadas como primera medida, con el objetivo de realizar un análisis comparativo entre estas y de seleccionar la unidad que tenga un mejor desempeño a unas condiciones de pozo dadas.

Después de identificar las variables más influyentes sobre el sistema de bombeo mecánico se desarrolló una metodología de selección que permite a cualquier persona interesada hacer un screening de selección de las unidades estudiadas en el presente trabajo de grado.

Con el fin de facilitar el trabajo de selección, se programó una hoja de Excel que realiza automáticamente el screening de selección a partir de datos de un pozo a evaluar suministrados por el usuario. Este programa entrega una lista con las unidades de bombeo mecánico jerarquizadas de acuerdo con el desempeño que tendrían en dicho pozo.

1. BOMBEO MECÁNICO

El bombeo mecánico convencional es casi tan antiguo como la industria petrolera. Fue desarrollado a partir de las primeras experiencias de perforación por percusión, donde se usaba una especie de balancín hecho de madera. Cuando el flujo natural del pozo cesaba, este balancín era usado para operar la bomba de subsuelo.

Actualmente el balancín, símbolo de este método, todavía se usa el movimiento rotatorio del motor reciprocante para impulsar la bomba.

1.1. UNIDADES CONVENCIONALES DE BOMBEO MECÁNICO

Las unidades convencionales utilizan el movimiento reciprocante de varillas para accionar la bomba en fondo y permitir el levantamiento de fluido, en superficie son balanceadas mediante contrapesas. El limitante que se tiene con estas unidades es la distancia de la carrera en superficie, la misma que es más corta en relación con las unidades no convencionales.

1.1.1 Balancín. Es el modelo más antiguo y usado en la industria, cuyos orígenes se basan en los aparatos usados para perforar pozos. Convierte el movimiento rotacional del motor en movimiento recíproco vertical que transmite a la sarta de varillas. Tiene el punto de apoyo en la mitad de la viga y puede rotar en sentido horario o anti-horario.

Estas unidades de bombeo comúnmente se han instalado en profundidades que oscilan entre los 60 y 3000 metros y a temperaturas máximas de 288°C, por lo que son altamente utilizadas para pozos de crudo pesado.

Ventajas:

- Menor costo que otro tipo de unidades.
- Bajo costo de mantenimiento.
- Puede bombear más rápido que la unidad Mark II.
- Requiere menos contrabalanceo que la unidad Mark II.

Desventajas:

- Menor eficiencia que la unidad Mark II en muchas aplicaciones.
- Puede requerir una caja de velocidades mayor que otras unidades.

Figura 1. Balancín Convencional



Fuente: Panoramio

1.1.2. Aerobalanceada. Fue desarrollada en la década de 1920 a partir de la unidad convencional. Usa la presión dentro de un cilindro para generar el contrapeso requerido por la carga del pozo. La rotación de la manivela puede ser en ambas direcciones. Requieren un mayor mantenimiento, pero eliminan el peligro de manipular piezas muy pesadas al balancearlos.

Ventajas

- Más compacta y fácil de balancear e instalar que otro tipo de unidad.
- Costos de transporte más bajos.
- Puede rotar en sentido horario y anti-horario.

Desventajas

- Requieren mayor mantenimiento.
- La condensación del aire comprimido en el cilindro puede ocasionar problemas.
- La caja de engranajes puede dañarse si el cilindro pierde la presión del aire.

Figura 2. Unidad Balanceada por aire



Fuente: UTEN Nacional

1.1.3. Mark II. Implementada a partir de los años 60, su diseño requiere menos energía que uno convencional para levantar la misma carga de fluidos. Fue diseñado con el propósito de disminuir los requerimientos de torque y potencia de las unidades convencionales. Las contrapesas están colocadas en una manivela

de doble brazo, separados y opuestos a la manivela de los pines con un ángulo de desfase que oscila entre 19° y 28°.

Este desfase hace que el torque de las pesas se atrase respecto al de la carga de fluido al comienzo de la carrera ascendente y que se adelante al comienzo de la descendente, lo que se traduce en mayor aceleración y menores cargas mínimas en la barra pulida.

La rotación de la manivela del Mark II es unidireccional en sentido anti-horario.

Ventajas

- Variación neta del troque más uniforme durante todo el ciclo de bombeo.
- Mejor llenado de barril de trabajo.

Desventajas

- La unidad es unidireccional y siempre debe ser impulsada en una dirección específica.
- En algunas ocasiones no bombea tan rápido como las otras unidades.
- Puede colocar la base de la sarta de varillas en compresión severa.

Figura 3. **Unidad Mark II**



Fuente: Panoramio

1.2. UNIDADES NO CONVENCIONALES DE BOMBEO MECÁNICO

Estas unidades al igual que las convencionales aprovechan el movimiento recíprocante de las varillas para accionar la bomba en fondo y permitir el levantamiento de fluido. Las unidades no convencionales se diferencian en su estructura y carrera en superficie.

1.2.1. Reverse Mark (RM). Esta unidad es el último desarrollo en el diseño de unidades de viga. Aunque es similar en apariencia a la unidad convencional, la geometría de la unidad de la RM puede reducir los requerimientos de torque y potencia en muchas aplicaciones. En algunos casos, un reductor de engranaje y motor primario más pequeño puede ser utilizado. El incremento de la eficiencia se consigue colocando el reductor de engranaje en su parte posterior para mejorar la interacción de pozo y el contrabalanceo del torque. La sincronización del contrabalanceo del torque se ajusta inclinando la ubicación del pin del cigüeñal en el brazo de la manivela. Estos dos cambios crean una geometría en la unidad de bombeo, un torque neto más suave en el reductor de engranajes y en los elementos de accionamiento superficial. Otro efecto de estas mejoras en el diseño es que la velocidad de la carrera ascendente de la varilla pulida es ligeramente menor que la carrera descendente por lo que se tiene un mejor llenado en el barril de trabajo.

Figura 4. Unidad Reverse Mark



Fuente: Jack Artificial Lift Machinery Co.

1.2.2. Unidad de bombeo de bajo perfil. Las unidades de bajo perfil fabricadas por Lufkin Industries fueron diseñadas para permitir el bombeo de pozos ubicados en zonas urbanas. Está unidad utiliza dos barras mecánicas articuladas (pitmans o bielas) conectadas a unas poleas a través de una línea de acero para convertir el movimiento rotatorio en recíprocante. Con menos partes móviles que una unidad convencional, se tiene un mayor ahorro energético al no necesitar mayor potencia el motor primario.

Este tipo de diseño elimina por completo la caja de engranajes, y en su lugar se instala una correa. Esta clase de unidad permite una transferencia de energía más eficiente que los convencionales. Su geometría también es única, lo que permite una lenta y larga carrera ascendente y una rápida y corta carrera descendente, haciendo a esta unidad una opción ideal para instalaciones con sarta de varillas de fibra de vidrio. La unidad de bajo perfil está diseñada para funcionar en ambas direcciones (sentido horario y anti-horario).

Figura 5. Unidad de bombeo de bajo perfil



Fuente: Chengdu Bode Petroleum Equipment Manufacturing Co.

1.2.3. Morlift. Unidad hidroneumática de alto rendimiento, ideal para todas las aplicaciones de petróleo y gas. El sistema de bombeo hidráulico que funciona en

conjunto con el sistema de nitrógeno reduce la fluctuación de la carga, reduciendo así la presión sobre el motor y el sistema hidráulico. Con una capacidad de elevación de hasta 40000 libras y una longitud de carrera de hasta 144 pulgadas, esta unidad puede producir desde una profundidad de 2500 m y puede producir hasta 630 barriles por día. El sistema de nitrógeno permite contrarrestar el bombeo de menor potencia, que a su vez aumentan la eficiencia de combustible.

Esta unidad realiza el contrabalanceo por medio de 4 acumuladores de nitrógeno que son precargados según la configuración del pozo y que generan energía adicional al aceite hidráulico que accionan los cilindros de doble acción. Adicionalmente, este contrabalanceo reduce el consumo de energía eléctrica debido a que en el momento de realizar los cambios de recorrido se generan picos importantes que son asumidos por los acumuladores de nitrógeno. Por tanto, reduce la tensión del motor y de los componentes hidráulicos y evita tiempos de inactividad innecesarios para realizar los servicios de mantenimiento y reparación. Además, permite el bombeo con una potencia menor, aumentando la eficiencia del combustible y reduciendo los costos operativos.

Ventajas:

- Recorrido entre 0,1 in y 144 in
- Velocidad Máxima en recorrido 5,5 SPM
- Conexión directa sobre cabeza de pozo en bridas de: 7-1/16" x 2000, 3000 o 5000
- Controlador FillPump, que garantiza un llenado mínimo del 80% del barril o menos según como se requiera.
- Control digital de recorrido y parámetros de funcionamiento
- 40000 lb. De carga axial máxima
- Bajos costos en armado y fácil instalación
- Operación y mantenimiento sencillo

- No necesita de vientos o anclajes, el montaje se hace directamente en el cabezal de producción
- Posee un controlador de velocidad hidráulica variable que optimiza la producción y tiene la capacidad de controlarse remotamente
- La unidad puede ser instalada en menos de 3 horas con una labor mínima de equipos
- En operación permite variar la velocidad de la carrera y la longitud mientras que el convencional requiere cerrar la producción del sistema, lo que ayuda a disminuir pérdidas.

Figura 6. Unidad de Bombeo Morlift



Fuente: NOY Completion and Production Solutions

1.2.4. Corlift. Unidad de bombeo hidráulico, tecnología probada en la industria, de costos competitivos, ideal para diferentes aplicaciones de petróleo y gas. Sus bajos costos de instalación y una mínima perturbación del suelo hacen que estas unidades de bajo perfil sean ideales para bombear en áreas donde las unidades de bombeo convencionales no son económicas. Este sistema consiste de un

cilindro hidráulico simple que se instala directamente en el cabezal del pozo y recibe energía a través de un patín de potencia.

Tiene capacidades de levantamiento para una carga máxima en la barra pulida de hasta 30000 lb y longitud de carrera variable de hasta 144 pulgadas.

Ventajas:

- Bajo costo de instalación
- Tiempo mínimo de instalación (requiere 3 horas con un camión con brazo hidráulico de 1 tonelada)
- Se mueve fácilmente, requiriendo mano de obra mínima
- Patín de potencia disponible a gas, diésel o eléctrico
- Bajo perfil y perturbación mínima, lo que implica un impacto ambiental mínimo
- No se requieren cables guía
- Ajustes rápidos y fáciles de velocidad y de longitud de carrera
- La velocidad variable de la carrera permite un llenado óptimo de la bomba
- Puede utilizarse con rotadores de varilla o de tuberías

Figura 7. Unidad de bombeo Corlift



Fuente: NOY Completion and Production Solutions

1.2.5. Rotaflex. El pivote se encuentra entre la carga del pozo y la generación de torque. Por tanto, puede incluirse como una unidad Clase I. La diferencia radica en que el brazo del torque es de solamente 18 pulgadas y por tanto necesita menos esfuerzo. Su configuración consta principalmente por una correa de carga, el tambor de correa de carga, la caja de contrapesos y el mecanismo de reversa, en la parte de la base se encuentra el reductor de engranes y el motor.

El equipo trabaja a muy bajos ciclos por minuto (en caso de ser necesario). Esto logra un mejor llenado del barril de la bomba (mayor producción) y una reducción en los esfuerzos de tensión y compresión sobre la sarta de varillas.

Incrementa la producción debido a que la varilla pulida opera a velocidades constantes durante la carrera ascendente y descendente, lo que reduce el desgaste entre las partes móviles y los problemas por golpe de fluido. De igual modo reduce la carga estructural sobre el equipo, alargando la vida útil del mismo. Genera un mayor coeficiente de compresión en la bomba, por lo que se minimizan los problemas por interferencia de gas.

Cuenta con una caja de contrapesos que resulta mucho más fácil y segura de operar, ya que, para balancear la unidad, se colocan o retiran conforme la unidad lo requiera, placas de metal de cierto peso. Por otro lado, utiliza cajas reductoras de menor tamaño que las de una unidad convencional, debido a su corto brazo de torque que mide 18 pulgadas.

Debido a que el motor y la caja de engranaje son cargados de manera uniforme, permitiendo al motor operar en un rango más eficiente la mayor parte del tiempo, la eficiencia total del sistema es mayor que la de una unidad convencional, siempre y cuando se encuentre bien balanceada.

El equipo normalmente armado en una sola pieza cuenta con un eje de rotación en la base que permite doblar la unidad, que facilita su traslado al lugar de instalación.

Figura 8. Unidades Rotaflex



Fuente: Weatherford International, LA.

1.2.6. Dynapump. La unidad de bombeo de carrera larga Dynapump cuenta con sensores electrónicos, equipamiento hidráulico y sistemas de monitoreo computarizado con el propósito de extraer aceite de forma más eficiente tanto para pozos profundos como someros.

En la categoría de unidades de carrera Extra-Larga, el DynaPump tiene versiones de 240", 268", 336" y 360".

Esté sistema consiste de dos componentes principales los cuales son la unidad de bombeo y la unidad de potencia o motriz. La unidad de potencia maneja la unidad de bombeo y es el control central del sistema, la cual provee la capacidad de convertir la energía eléctrica en energía hidráulica y de controlar la carrera de la bomba por medio de un sistema de modem radio. Algunas de estas unidades han excedido el record de producción de fluidos para sistemas hidráulicos, siendo capaces de producir tasas que superan los 10000 bpd.

Figura 9. Unidad Dynapump



Fuente: Tundra Solutions Ltd.

1.2.7. VSH2. La unidad VSH2 es una unidad de bombeo alternativo para el movimiento de varillas, el principio de funcionamiento se basa en presiones hidráulicas compensadas por la compresión y expansión de nitrógeno.

El nitrógeno que se encuentra dentro de un acumulador soporta $2/3$ de la carga total del vástago pulido y es capaz de remplazar a los contrapesos de una unidad de bombeo convencional.

Con el principio de la hidroneumática se pueden levantar cargas de hasta 40.000 libras en la barra pulida, con una carrera máxima de 120 pulgadas y con hasta ocho golpes por minuto.

Figura 10. Unidad VSH2



Fuente: Weatherford International, LA

1.2.8. Linear Rod Pump. Unidad electromecánica de bombeo mecánico, donde un drive de UNICO con software inteligente controla a un motor de inducción que transmite potencia a una caja de engranajes y a su vez esta permite un movimiento de vaivén (ascendente y descendente) vertical a la sarta de varillas, conectada a través de la Barra Pulida en su tope.

La LRP ofrece un control importante sobre la superficie y el fondo de pozo, así como las condiciones de bombeo. Esto permite que se pueda operar el sistema con la máxima eficiencia y a su vez reducir los costos de los insumos eléctricos.

Esta unidad puede mejorar los problemas de baja eficiencia causada por la carga del motor cíclico, las cargas por mal uso del motor y de un sistema de equilibrio inadecuado, mediante la mejora de carga del motor y la eliminación de equilibrio del sistema.

Además de mejorar la producción y prolongar la vida útil de un sistema de bombeo, los sistemas de extracción artificial con bomba de vara lineal LRP® de Unico ofrecen ventajas notorias que superan a las bombas de balancín convencionales en cuanto a seguridad, estética y tamaño compacto.

Ventajas:

- Menor costo que una unidad convencional
- Espacio físico reducido
- Fácil de transportar
- Fácil de instalar, reparar y remover
- Mantenimiento sencillo y sin grandes maquinarias
- No requiere losa ni bases asociadas, debido a que se instala sobre la cabeza de pozo.

- Bajo consumo de energía
- Ideal para áreas pobladas (sin ruidos molestos), adaptable al ambiente natural
- Control de posición y velocidad variable
- Facilita la entrada de un equipo de servicio a pozo, debido a que no ocupa mucho espacio y se desinstala en menos de 2 horas.

Figura 11. Unidad Linear Rod Pump



Fuente: UNICO

1.2.9. Crank Rod Pump. La CRP de UNICO es una alternativa innovadora a las bombas de viga convencionales y bombas de cavidad progresivas. El sistema CRP proporciona un rendimiento y una eficiencia excepcionales utilizando controles sofisticados y una mecánica sencilla. El paquete ultracompacto tiene una huella mínima y un perfil muy bajo. Dado que no tiene partes peligrosas móviles expuestas, la unidad CRP es una solución completamente segura para el uso en instalaciones urbanas donde otros tipos de levantamientos pueden ser peligrosos. El sistema es ideal para pozos poco profundos y de bajo caudal, incluso en lugares remotos sin servicio eléctrico.

El sistema CRP es una inversión inteligente que se paga rápidamente por sus costos reducidos de instalación, operación y mantenimiento. El sistema CRP se puede comprar por una fracción de lo que costaría una bomba jack comparable sin ningún tipo de controles. La instalación es mucho menos costosa porque la unidad

es tan fácil de transportar y configurar. Puesto que la unidad va directamente a la cabeza del pozo, las almohadillas del concreto y de grava y otras preparaciones costosas del sitio no son más necesarias. El aumento de la producción aumenta los ingresos y reduce el tiempo de inactividad disminuyendo así los costes operativos, convirtiendo al sistema CRP en una solución verdaderamente económica.

1.2.10. MaxiStroke. Unidad económica, fácilmente transportable y rápida instalación en cualquier pozo de bombeo mecánico existente, la cual paga beneficios con cada stroke. El MaxiStroke en tiempo real ajustable, ultra-largo, carrera de velocidad variable se auto-ajusta a los niveles de fluidos dinámicos en el pozo para optimizar el rendimiento del pozo. El software integrado de control de la bomba detecta automáticamente las condiciones de fondo de pozo y cambia los niveles de carga, y luego ajusta la velocidad de la unidad para mantener niveles óptimos de fluido.

Es una solución económica para todos los pozos de bombeo, incluyendo situaciones de levantamiento para la producción de petróleo de bajo API o pesados. Los beneficios de MaxiStroke de recorrido largo y extra largo incluyen fatiga reducida de la varilla, así como desgaste de la varilla y la tubería, lo que paga su costo en menos intervenciones y tiempo de inactividad asociado.

Ventajas.

- Se ajusta automáticamente a los niveles dinámicos de fluidos para optimizar el funcionamiento del pozo
- Intervenciones reducidas
- Menor desgaste de las varillas y tubos
- Se adapta a todos los cabezales y sistemas de pozo
- Fácil y económico de transportar, instalar y mantener

Figura 12. Unidad Maxistroke



Fuente: HALLIBURTON

2. GUÍA DE SELECCIÓN DE UNIDADES DE BOMBEO MECÁNICO

Con el objetivo de facilitar el proceso de selección de la unidad de bombeo mecánico más adecuada para un determinado pozo, en el presente trabajo de grado se ha desarrollado un programa en Microsoft Excel que a través de unos datos de entrada pondera las unidades de bombeo mecánico, convencionales y no convencionales, de acuerdo con su desempeño.

Para lograrlo se han jerarquizado las variables involucradas en un Sistema de Bombeo Mecánico a través del Método de Análisis Estructural usado en la Metodología de los Escenarios.

Las variables seleccionadas para hacer parte de este estudio fueron organizadas en cinco grandes grupos. Estos conjuntos son:

- Características del fluido
- Variables de diseño
- Información el pozo
- Aspectos financieros
- Otras consideraciones

2.1. METODOLOGÍA DE LOS ESCENARIOS

Según Alexandra V. Cely B. en la Revista Ingeniería e Investigación No. 44, la Metodología de Escenarios tiene como propósito “analizar el fenómeno en estudio desde un punto de vista retrospectivo y actual, teniendo en cuenta la influencia de

grupos sociales gestores de su desarrollo para, posteriormente, presentar la realidad futura en forma de escenarios”.

Esta metodología se desarrolla en tres fases: análisis estructural, análisis del juego de actores y elaboración de escenarios. Para este caso sólo se realizó la primera fase de la metodología ya que el objetivo de este proyecto tiene un enfoque actual y no es necesario usar la prospectiva.

2.1.1. Análisis Estructural. El Análisis Estructural es un método cualitativo que permite comprender y describir los problemas como un sistema, el cual está compuesto por diferentes variables que se relacionan e interactúan entre sí. De esta manera, mediante el Análisis Estructural se puede elaborar una lista de variables del sistema y clasificarlas de acuerdo con la influencia que ejercen unas sobre otras.

El análisis estructural cubre las dos primeras fases de la construcción de la base analítica y se desarrolla en tres pasos:

- Identificación de variables y delimitación del sistema.
- Localización de las relaciones en la matriz de análisis estructural.
- Búsqueda de las variables esenciales a través del método MICMAC (análisis de motricidad y dependencia).

En el presente trabajo de grado se hizo uso de este método para determinar las variables que tiene mayor importancia al momento de decidir que unidad de bombeo mecánico instalar en un determinado pozo. Se consideró, entonces, un sistema compuesto por la unidad de bombeo mecánico, la sarta de varillas, el pozo, y el fluido que se está produciendo.

- **Identificación de Variables y delimitación del sistema:** Con el objetivo de definir con mayor precisión el sistema y delimitarlo, inicialmente se elaboró una lista completa de variables que influyen sobre este y que, por tanto, deben ser tenidas en cuenta sin importar si pueden ser cuantificables o no. Para elaborar este listado de variables se realizó una revisión bibliográfica exhaustiva y se recurrió a entrevistas con expertos.

Las variables escogidas se presentan en la tabla 1.

Tabla 1. Variables que influyen sobre el sistema

<i>Características del fluido:</i>	<i>Información del pozo</i>	<i>Aspectos financieros</i>
Gravedad API Corte de agua Viscosidad en fondo del crudo Relación gas aceite (GOR) Factor Volumétrico de Formación	Caudal de producción Diámetro del tubing Presión anular Presión en cabeza de pozo Tipo de completamiento	CAPEX Costo de mantenimiento Costo de combustible o energía OPEX Precio del barril de crudo
<i>Variables de diseño:</i>	<i>Facilidades de Superficie:</i>	<i>Otras consideraciones:</i>
Cargas totales Diámetro del Pistón Profundidad de asentamiento de la bomba Velocidad de bombeo Longitud de Stroke Tipo de varilla Diámetro o número de varilla	Consumo de energía Espacio disponible en superficie Locación Requerimientos de potencia del motor Facilidad de instalación de la unidad Disponibilidad de energía Eléctrica	Impacto ambiental Existencia de personal experimentado Frecuencia de mantenimiento de la unidad Eficiencia del llenado de la bomba

- **Localización de las relaciones en la matriz del análisis estructural:** Para elaborar la matriz de análisis estructural se creó un cuadro de doble entrada en

Excel, dónde se situó la lista de variables en la primera fila y la primera columna. En dicho cuadro se interrelacionaron las variables, de acuerdo con la influencia que las variables ubicadas en la primera fila ejercen sobre las que están en la primera columna.

De acuerdo con el método de Análisis Estructural, la influencia que una variable puede ejercer sobre otra puede ser de tres clases. En la *Influencia Directa* la influencia de la variable A sobre la variable B es tal que cualquier cambio en A provoca que B también se modifique. La *Influencia Indirecta* se presenta cuando el cambio en la variable A afecta a la variable B, y la variación de esta última modifica a una tercera variable, C. Por lo tanto, A influye indirectamente sobre la variable C. Por último, la *Influencia Potencial* se identifica analizando si la variable A podría afectar a la variable B en el futuro.

Lo ideal es que esta valoración sea realizada por expertos, personas con un profundo conocimiento del sistema y que pertenecen a alguno de los actores. En la presente tesis se recurrió a la asesoría de 5 expertos que avalaron la matriz de análisis estructural realizada por los autores.

El análisis estructural, se realizó utilizando el código indicado en el siguiente cuadro.

Tabla 2. Código de diligenciamiento de la matriz estructural

Tipo de influencia	Código
Influencia Potencial	0
Influencia Real	1
Influencia Nula	0

Fuente: Método MICMAC, metodología de los escenarios para estudios prospectivos. Modificado por los autores.

Diligenciando la matriz de análisis estructural con este código se obtuvo el sistema binario de oposición *Influencia real (1) vs. Influencia nula y potencial (0)*. De acuerdo con este sistema se le asignó el número uno a las relaciones de

influencia real, que corresponde a una influencia directa o indirecta, y el número cero a las relaciones de influencia nula o potencial.

- **Búsqueda de las variables claves a través del método MICMAC:** Para determinar las variables clave del sistema se realizó un análisis de relaciones directas e indirectas, cuyo propósito es analizar los efectos directos e indirectos existentes entre las variables y jerarquizarlas de acuerdo con sus índices de motricidad y dependencia.

El índice de motricidad se obtuvo sumando los valores de la columna correspondiente a la variable en estudio y el índice de dependencia es el resultado de la suma de los valores de la fila correspondiente a dicha variable.

Por practicidad, los índices de motricidad y dependencia se enuncian en porcentajes, para lo cual se usaron las siguientes expresiones:

$$\frac{IM}{SMI} \times 100 = \%M \quad \text{Ecuación 2.1}$$

$$\frac{ID}{SDI} \times 100 = \%D \quad \text{Ecuación 2.2}$$

Donde,

IM: índice de motricidad

ID: índice de dependencia

SMI: sumatoria de los índices de motricidad

%M: porcentaje de motricidad

SDI: sumatoria de dependencia

Una vez calculados los porcentajes de motricidad y dependencia de cada variable, se relacionaron estos porcentajes en un plano cartesiano. En la

abscisa (eje X) se ubicó el porcentaje de dependencia y en la ordenada (eje Y) se puso el porcentaje de motricidad.

El plano obtenido se dividió en cuatro zonas. La *Zona de poder* agrupa las variables de más baja dependencia y más alta motricidad, las cuales son muy fuertes y poco vulnerables. Influyen sobre las demás variables, pero no se afectan fácilmente. Si se modifican, modifican el sistema.

En la *Zona de salida* se encuentran las variables de alta dependencia, pero baja motricidad. Esto quiere decir que son altamente influenciadas, pero influyen poco sobre las demás variables.

La *Zona de conflicto* es el conjunto de variables de alta motricidad y dependencia, es decir, que influyen sobre las demás, pero también son influidas por ellas. El modificarlas afectará a otras variables que estén dentro de esta zona y a las de la zona de salida.

Finalmente, la *Zona de problemas autónomos* abarca a las variables de más baja motricidad y dependencia. Este tipo de variables son despreciables porque no influye significativamente sobre el sistema.

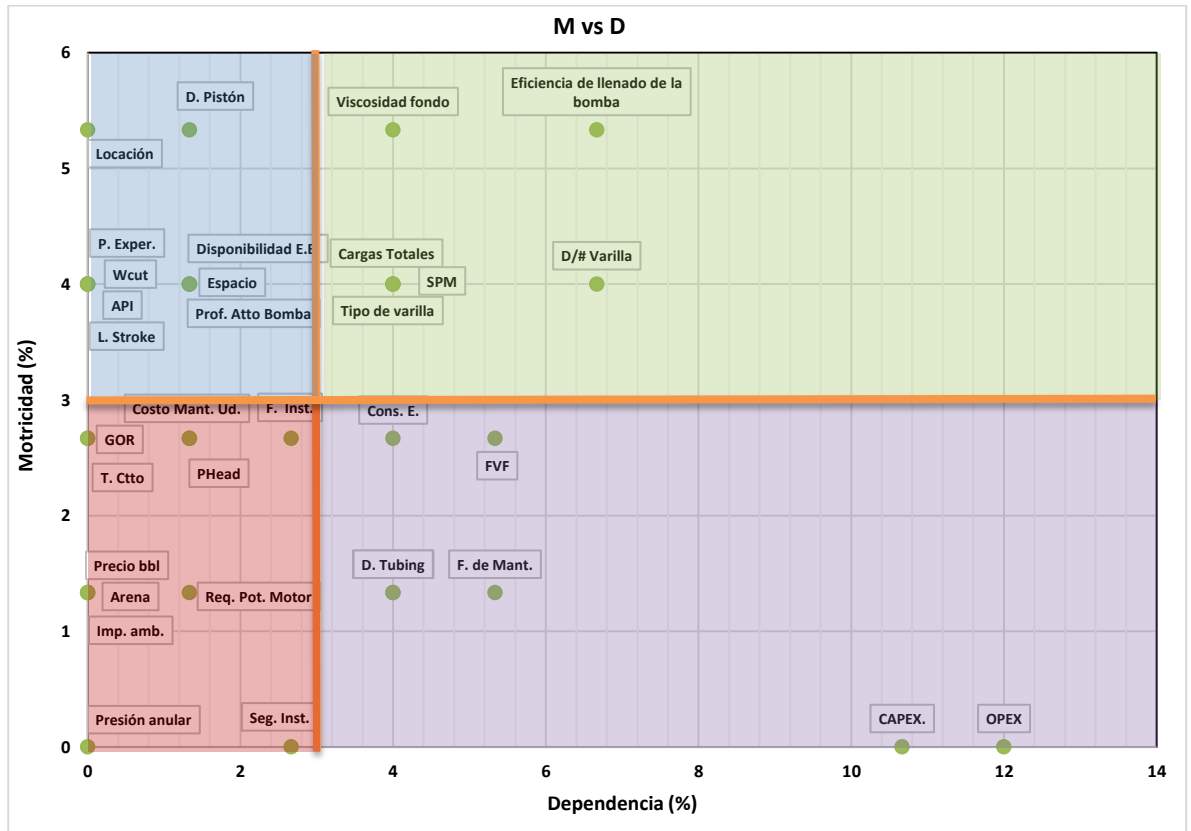
El límite (en porcentaje) entre estas cuatro zonas, se obtuvo de la siguiente forma:

$$m = \frac{100}{n} = \frac{100}{34} = 2,94$$

Siendo n el número de variables del sistema que para este caso es de 34.

Para facilitar al lector la identificación de las zonas, se le asignó un color a cada una de ellas. El azul para la Zona de Poder, el verde para la Zona de Conflicto, el morado para la Zona de Salida y el rojo para la Zona de Problemas Autónomos. El gráfico obtenido fue el siguiente:

Figura 13. Gráfica Motricidad Vs Dependencia



Fuente. Método MICMAC, metodología de los escenarios para estudios prospectivos. Modificado por los autores.

De esta manera se clasificaron las variables del sistema en cuatro zonas, de acuerdo con la posición que ocupan en el gráfico.

Figura 14. Clasificación de las variables que afectan el sistema en cuatro zonas

Zona de Poder	Zona de Conflicto
Locación Diámetro de Pistón Existencia de personal experimentado API Corte de agua Longitud del stroke Espacio disponible en superficie Profundidad de asentamiento de la bomba Disponibilidad de energía eléctrica	Caudal de Producción Eficiencia de llenado de la bomba Cargas Totales Tipo de varillas Velocidad de bombeo Diámetro/número de varilla Viscosidad en fondo del aceite
Zona de Problemas Autónomos	Zona de Salida
Tipo de completamiento Presión en cabeza Costo de mantenimiento de la unidad GOR Facilidad de instalación Impacto Ambiental Arena Precio Barril Presión anular Seguridad de instalación Requerimientos de potencia del motor	Consumo de energía de la unidad Costos de combustible o energía Frecuencia de Mantenimiento Diámetro del tubing CAPEX OPEX Factor Volumétrico de Formación

De acuerdo con esta clasificación se determinaron las variables que debían ser usadas en la guía de selección (variables en zona de poder y zona de conflicto), su importancia, y cuáles se descartarían (variables en zona de problemas autónomos y zona de salida). Entonces las variables clave del sistema son:

- Espacio disponible en superficie
- Velocidad de bombeo
- Locación
- Disponibilidad de energía eléctrica
- Carga Total Máxima
- Profundidad de asentamiento de la bomba
- Longitud del stroke
- Eficiencia de llenado de la bomba
- Diámetro de Pistón
- Caudal de Producción
- API
- Corte de agua
- Existencia de personal experimentado
- Diámetro/número de varilla
- Viscosidad en fondo del aceite
- Tipo de varillas

Aunque todas las variables anteriormente enunciadas son importantes, sólo las ocho de la izquierda se tomaron como variables base para la evaluación que realiza el programa en Excel creado por los Autores. Las demás se usaron para hacer cálculos y para dar sugerencias.

2.2. RANGOS DE APLICACIÓN DE LAS VARIABLES CLAVES DEL SISTEMA

El grado de aplicación de cada unidad de bombeo mecánico bajo determinadas condiciones se establecerá de manera cuantitativa en el programa en Excel elaborado por los autores, de acuerdo con una clasificación cualitativa de los rangos de desempeño de cada unidad. Dicha clasificación se describe a continuación:

- *No Aplicable*: Define el rango en el cual la unidad de bombeo mecánico tendría un desempeño nulo o deficiente o una vida útil excesivamente corta.

- *Restringido*: Describe el rango en el que la unidad de bombeo mecánico podría funcionar siempre y cuando se elabore un diseño especial que permita su aplicación a las condiciones requeridas.
- *Bueno*: Dentro de este rango la unidad operaría bajo condiciones para las cuales fue diseñado por lo cual su desempeño sería eficiente.
- *Óptimo*: Define el rango en el que la unidad de bombeo mecánico tiene su mayor eficiencia de operación y una vida útil más larga, por lo cual es el rango más adecuado para su implementación.

Con ayuda de una extensa revisión bibliográfica se establecieron los rangos de aplicación de las variables clave del sistema en cada una de las unidades de bombeo mecánico. La información recaudada se resumió en las tablas mostradas a continuación.

2.2.1 Balancín.

Tabla 3. Rangos de aplicación de las variables clave para balancín

Variable	No aplica	Restringido	Bueno	Óptimo
	0	1	2	3
Espacio disponible en superficie (m ²)		< 3000	3000 - 5000	> 5000
Carga máxima (lb)	> 47000			
Locación	Offshore			Onshore
Energía eléctrica disponible			NO	SÍ
Profundidad de asentamiento de la bomba (ft)	>14000	10001-14000	3001-10000	1 a 3000
Índice 1 (in*SPM)	<0	> 800	500 - 800	< 500
Índice 2		X		

Fuente: LUFKIN. Pumping units. Modificada por los autores.

2.2.2 Aerobalanceada.

Tabla 4. Rangos de aplicación de las variables clave para la Unidad Aerobalanceada

Variable	No aplica	Restringido	Bueno	Óptimo
	0	1	2	3
Espacio disponible en superficie (m2)		< 3000	3000 - 5000	> 5000
Carga máxima (lb)	> 47000			
Locación	Offshore			Onshore
Energía eléctrica disponible			NO	SI
Profundidad de asentamiento de la bomba (ft)	>12000	11001-12000	6001-11000	1 a 6000
Índice 1 (in*SPM)	<0	> 800	500 - 800	< 500
Índice 2		X		

Fuente: LUFKIN. Pumping units. Modificada por los autores.

2.2.3 Beam Balance Pump.

Tabla 5. Rangos de aplicación de las variables clave para la Unidad Beam Balance

Variable	No aplica	Restringido	Bueno	Óptimo
	0	1	2	3
Espacio disponible en superficie (m2)		< 3000		3000 – 5000
Carga máxima (lb)	> 11900			
Locación		Offshore		Onshore
Energía eléctrica disponible			NO	SI
Profundidad de asentamiento de la bomba (ft)	> 16000	14001-16000	11001-14000	100 a 11000
Índice 1 (in*SPM)	<0	> 800	500 - 800	< 500
Índice 2		X		

Fuente: LUFKIN. Pumping units. Modificada por los autores.

2.2.4 Mark II.

Tabla 6. Rangos de aplicación de las variables clave para la Unidad Mark II

Variable	No aplica	Restringido	Bueno	Óptimo
	0	1	2	3
Espacio disponible en superficie (m2)		< 3000	3000 - 5000	> 5000
Carga máxima (lb)	> 42700			
Locación	Offshore			Onshore
Energía eléctrica disponible			NO	SI
Profundidad de asentamiento de la bomba (ft)	>12000	11001-12000	6001-11000	1 a 6000
Índice 1 (in*SPM)	<0	> 800	500 - 800	< 500
Índice 2			X	

Fuente: LUFKIN. Pumping units. Modificada por los autores.

2.2.5 Reverse Mark (RM).

Tabla 7. Rangos de aplicación de las variables clave para la Unidad Reverse Mark

Variable	No aplica	Restringido	Bueno	Óptimo
	0	1	2	3
Espacio disponible en superficie (m2)		< 3000	3000 - 5000	> 5000
Carga máxima (lb)	> 42700			
Locación	Offshore			Onshore
Energía eléctrica disponible			NO	SI
Profundidad de asentamiento de la bomba (ft)	>12000	11001-12000	6001-11000	1 a 6000
Índice 1 (in*SPM)	<0	> 800	500 - 800	< 500
Índice 2			X	

Fuente: LUFKIN. Pumping units. Modificada por los autores.

2.2.6 Unidad de bombeo de bajo perfil.

Tabla 8. Rangos de aplicación de las variables clave para la Unidad de Bajo Perfil

Variable	No aplica	Restringido	Bueno	Óptimo
	0	1	2	3
Espacio disponible en superficie (m ²)		< 3000		3000 – 5000
Carga máxima (lb)	> 24600			
Locación	Offshore			Onshore
Energía eléctrica disponible			NO	SI
Profundidad de asentamiento de la bomba (ft)	>14000	10001-14000	3001-10000	1 a 3000
Índice 1 (in*SPM)	<0	> 800	500 - 800	< 500
Índice 2			X	

Fuente: LUFKIN. Pumping units. Modificada por los autores.

2.2.7 Rotaflex.

Tabla 9. Rangos de aplicación de las variables clave para la Unidad Rotaflex

Variable	No aplica	Restringido	Bueno	Óptimo
	0	1	2	3
Espacio disponible en superficie (m ²)		< 3000		3000 – 5000
Carga máxima (lb)	> 50000			
Locación	Offshore			Onshore
Energía eléctrica disponible	NO			SI
Profundidad de asentamiento de la bomba (ft)	> 12000	9001 a 12000	4501 a 9000	2000 a 4500
Índice 1 (in*SPM)	<0	> 800	500 - 800	< 500
Índice 2				X

Fuente: WEATHERFORD. Reciprocating Rod Lift, 2007. Modificada por los autores.

2.2.8 Morlift.

Tabla 10. Rangos de aplicación de las variables clave para la Unidad Morlift

Variable	No aplica	Restringido	Bueno	Óptimo
	0	1	2	3
Espacio disponible en superficie (m2)			< 3000	3000 - 5000
Carga máxima (lb)	> 40000			
Locación	Offshore			Onshore
Energía eléctrica disponible			NO	SI
Profundidad de asentamiento de la bomba (ft)	> 13000	11001-13000	6000-11000	2000-6000
Índice 1 (in*SPM)	<0	> 800	500 - 800	< 500
Índice 2			X	

Fuente: NOY. Sistemas de Bombeo Mecánico, 2015. Modificada por los autores.

2.2.9 Corlift.

Tabla 11. Rangos de aplicación de las variables clave para la Corlift

Variable	No aplica	Restringido	Bueno	Óptimo
	0	1	2	3
Espacio disponible en superficie (m2)			< 3000	3000 - 5000
Carga máxima (lb)	> 30000			
Locación	Offshore			Onshore
Energía eléctrica disponible		NO		SI
Índice 1 (in*SPM)	<0	> 800	500 - 800	< 500
Índice 2			X	

Fuente: NOY. Sistemas de Bombeo Mecánico, 2015. Modificada por los autores.

2.2.10 Dynapump.

Tabla 12. Rangos de aplicación de las variables clave para la Unidad Dynapump

Variable	No aplica	Restringido	Bueno	Óptimo
	0	1	2	3
Espacio disponible en superficie (m2)			< 3000	3000 - 5000
Carga máxima (lb)	> 80000			
Locación	Offshore			Onshore
Energía eléctrica disponible		NO		SI
Índice 1 (in*SPM)	<0	> 800	500 - 800	< 500
Índice 2				X

Fuente: DYNAPUM inc. Dynapum's Manual, 2010. Modificada por los autores.

2.2.11 VSH2.

Tabla 13. Rangos de aplicación de las variables clave para la Unidad VSH2

Variable	No aplica	Restringido	Bueno	Óptimo
	0	1	2	3
Espacio disponible en superficie (m2)			< 3000	3000 - 5000
Carga máxima (lb)	> 40000			
Locación		Offshore		Onshore
Energía eléctrica disponible		No		Si
Profundidad de asentamiento de la bomba (ft)	> 11000	3151-11000	2351-3150	1 a 2350
Índice 1 (in*SPM)	<0	> 800	500 - 800	< 500
Índice 2			X	

Fuente: WEATHERFORD Colombia Ltda. Modificada por los autores.

2.2.12 Linear Rod Pump.

Tabla 14. Rangos de aplicación de las variables clave para la Unidad LRP

Variable	No aplica	Restringido	Bueno	Óptimo
Espacio disponible en superficie (m ²)			< 3000	3000 - 5000
Velocidad de bombeo (spm)	> 20			
Locación			Offshore	Onshore
Disponibilidad de energía eléctrica		NO		SI
Carga máxima (lb)	> 30000			
Profundidad de asentamiento de la bomba (ft)	>12000	6000 a 12000	2350 a 6000	< 2350
Longitud del Stroke máxima (in)	> 120			

Fuente: UNICO, inc. Modificada por los autores.

2.2.13 Crank Rod Pump

Tabla 15. Rangos de aplicación de las variables clave para la Unidad CRP

Variable	No aplica	Restringido	Bueno	Óptimo
Espacio disponible en superficie (m ²)			< 3000	3000 - 5000
Velocidad de bombeo (spm)	> 25			
Locación			Offshore	Onshore
Disponibilidad de energía eléctrica			NO	SI
Carga máxima (lb)	> 7900			
Profundidad de asentamiento de la bomba (ft)	> 3500	2501 a 3500	1501 a 2500	500 a 1500
Longitud del Stroke máxima (in)	> 24			

Fuente: UNICO, inc. Crank Rod Pump. Modificada por los autores.

2.2.14 MaxiStroke.

Tabla 16. Rangos de aplicación de las variables clave para la Unidad MaxiStroke

Variable	No aplica	Restringido	Bueno	Óptimo
Espacio disponible en superficie (m ²)			< 3000	3000 – 5000
Velocidad de bombeo (spm)	> 10			
Locación	Offshore			Onshore
Disponibilidad de energía eléctrica		NO		SI
Carga máxima (lb)	> 30000			
Profundidad de asentamiento de la bomba (ft)	> 6000	6001-10000	4001-6000	2000-4000
Longitud del Stroke máxima (in)	> 240			

Fuente: HALLIBURTON. Surface Rod Pumping Unit.2013. Modificada por los autores.

3. METODOLOGÍA DE SELECCIÓN

3.1 INFORMACIÓN REQUERIDA

Para aplicar la metodología de selección de unidades de bombeo mecánico propuesta por los autores es necesario conocer las variables de evaluación enunciadas a continuación. Las variables adicionales fueron usadas para calcular algunas de las variables de evaluación.

Figura 15. Variables usadas para la selección de UBM

<i>Variables de evaluación:</i>	<i>Variables adicionales</i>
Cargas totales	Longitud de Stroke
Profundidad de asentamiento de la bomba	Viscosidad en fondo del crudo
Velocidad de bombeo	Caudal de producción
Espacio disponible en superficie	Diámetro del pistón
Locación	Gravedad API del crudo
Disponibilidad de Energía eléctrica	Corte de agua

Además de las variables de evaluación, se debe calcular dos índices que se centrarán en dos de las características principales de unidad, Máxima Velocidad de Bombeo y Máxima Longitud de Carrera. Estas dos variables son únicas no sólo para cada unidad, sino que también difieren de modelo a modelo.

El primer índice se obtiene partiendo de la siguiente ecuación:

$$Q = 0,1166 \times D^2 \times S \times N \times \eta$$

Ecuación 3.1

Donde,

Q	Desplazamiento de la bomba (BPD)
H	Eficiencia de la bomba
S	Longitud de stroke (ft)
N	Velocidad de bombeo (SPM)

Asumiendo que la eficiencia de la bomba es del 100% y despejando el producto de la Longitud del stroke y la Velocidad de bombeo obtenemos:

$$SN = \frac{Q}{0,1166 \times D^2}$$

Ecuación 3.2

Debe calcularse con los datos de Caudal y diámetro de pistón del pozo que está siendo considerado y compararse con los índices calculados para diferentes modelos de las unidades en estudio a partir de la Velocidad Máxima de Bombeo y la Máxima Longitud de Carrera especificados por el fabricante.

$$I1 = SN_{Teórico} - SN_{Calculado}$$

Ecuación 3.3

Para el segundo índice debe calcularse el cociente de la división de la velocidad de bombeo entre la longitud del stroke y el resultado se multiplica por la viscosidad del crudo. Así,

$$I2 = \mu \times \frac{S}{N}$$

Ecuación 3.4

3.2 EVALUACIÓN CUANTITATIVA DE LAS UNIDADES DE BOMBEO MECÁNICO

Para cuantificar el desempeño de las unidades se asignó un valor numérico entre 0 y 3 a los rangos cualitativos definidos anteriormente.

Tabla 17. Valores numéricos de los rangos cualitativos

No aplica	Restringido	Bueno	Óptimo
0	1	2	3

Se construyeron tablas para las diferentes unidades, en donde se clasificaron de manera cualitativa los rangos de aplicación de las seis variables de evaluación y los dos índices mencionados anteriormente, y dichos rangos se cuantificaron a través de los valores numéricos expresados en la Tabla 17.

Figura 16. Tabla de datos Balancín

Generalidades				
Variable	No aplica 0	Restringido 1	Bueno 2	Óptimo 3
Espacio disponible en superficie (m2)		< 3000	3000 - 5000	> 5000
Carga máxima (lb)	> 47000			
Locación	Offshore			Onshore
Energía eléctrica disponible			NO	SÍ
Profundidad de asentamiento de la bomba (ft)	>14000	10001-14000	3001-10000	1 a 3000
Índice 1 (in*SPM)	<0	> 800	500 - 800	< 500
Índice 2		X		
Características por modelos				
Variable	C-320D-256-144	C-640D-365-168	C-912D-305-240	C-1280D-427-192
Carga máxima (lb)	> 25600	36500	30500	42700
Velocidad de bombeo máxima (SPM)	> 14,29	13,23	11,07	12,37
Longitud de Stroke máxima (in)	> 144	168	240	192

Los datos ingresados por el usuario y los índices calculados se comparan con la información contenida en las tablas y a cada uno se le asigna un valor numérico según el rango al que pertenezcan. Este valor es almacenado en la matriz TCT, en donde las filas representan las unidades de bombeo mecánico y las columnas las variables a evaluar tal y como se muestra en la figura 17.

Figura 17. Fragmento de Matriz “TCT”

Unidad	Modelo	Locación	Espacio	Disponibilidad	Carga	I1	I2	Profundidad de asentamiento	Eficiencia Mecánica
Convencional	C-320D-256-144	3	2	3	1	1	1	2	1
	C-640D-365-168	3	2	3	1	1	1	2	1
	C-912D-305-240	3	2	3	1	1	1	2	1
	C-1280D-305-240	3	2	3	1	1	1	2	1
Aerobalancada	A-320D-256-120	3	2	3	1	1	1	3	2
	A-640D-305-168	3	2	3	1	1	1	3	2
	A-912D-470-240	3	2	3	1	1	1	3	2
	A-1280D-470-240	3	2	3	1	1	1	3	2
Beam Balance	B-25-67-36	3	3	3	0	0	1	3	1
	B-40-76-48	3	3	3	0	0	1	3	1
	B-50-89-54	3	3	3	0	0	1	3	1
	B-57-76-54	3	3	3	0	0	1	3	1
	B-80-119-64	3	3	3	0	0	1	3	1
	B-114-119-100	3	3	3	0	0	1	3	1
Mark II	M-320D-256-144	3	2	3	1	1	2	3	1
	M-640D-305-192	3	2	3	1	1	2	3	1
	M-912D-365-216	3	2	3	1	1	2	3	1
	M-1280D-427-216	3	2	3	1	1	2	3	1

Debido a que cada unidad de bombeo mecánico es fabricada en distintos modelos que pueden variar significativamente en cuanto a tamaño y rangos de aplicación, se decidió que el programa no sólo evalúe la unidad sino, además, sus modelos más reconocidos. El programa, entonces, cuenta con información de 15 unidades de bombeo mecánico y 61 modelos en total. De esta manera se le proporciona al usuario una mayor aproximación a sus necesidades.

3.3 PORCENTAJES DE LAS VARIABLES DE EVALUACIÓN

Al pensar en asignar porcentajes a las variables se observó que algunas influyen más que otras al momento de seleccionar una unidad de bombeo mecánico. Se decidió, entonces, dar a cada una un valor numérico de 1 a 5, de acuerdo con su influencia en la toma de decisión que justifica el presente trabajo de grado, luego sumar los valores numéricos asignados y dividir uno a uno entre el valor total para obtener un porcentaje por cada variable de evaluación.

Los puntos asignados y los porcentajes obtenidos se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 18. Puntuación y porcentaje de las variables de evaluación

Variables	N	Locación	Espacio	Disp.	PPRL	SN	$\mu(S/N)$	Prof.	Total
Puntos	2	3	1	1	5	4	4	1	21
Porcentaje	9,52	14,29	4,76	4,76	23,81	19,05	19,05	4,76	100

3.4 PONDERACIÓN Y SELECCIÓN DE LAS UNIDADES DE BOMBEO MECÁNICO MÁS APROPIADAS

Después de asignar la puntuación de las variables de evaluación para cada una de las unidades de bombeo mecánico, se multiplica la matriz “TCT” por la matriz “Porcentajes” y se divide entre 3, que en este caso es el número más alto de los valores numéricos asignados en el numeral 3.2.

$$Ponderado[i, j] = \frac{TCT[i, j] \times Porcentaje[i, j]}{3} \quad \text{Ecuación 3.5}$$

Luego los ponderados individuales son sumados para obtener un ponderado total.

$$P.Total[j] = \sum_{i=1}^{61} Ponderado[i, j] \quad \text{Ecuación 3.6}$$

3.5 PRESENTACIÓN DE LOS RESULTADOS

El Ponderado Total de cada modelo se presenta en la matriz “resultados”, asociados a la unidad y el modelo para el que fueron calculados y organizado de mayor a menor, de manera que el usuario identifique al modelo con mayor ponderado total como la opción más adecuada para su caso y el modelo con menor ponderado como el menos recomendado.

Tabla 19. Matriz “Resultados”

Unidad	Modelo	Ponderado Total
VSH2	60	68,3
Morlift	Modelo 40-144	68,3
LRP	L760g-mmmm-144	68,3
LRP	L480g-mmmm-100	68,3
LRP	L381-mmmm-086	68,3
Dynapump	13	66,7
Dynapump	9	66,7
Dynapump	11	66,7
MaxiStroke	LS-300-168	65,1
MaxiStroke	XLS-300-288	65,1
MaxiStroke	LS-180-168	65,1
MaxiStroke	XLS-250-240	65,1

4. PROGRAMA EN EXCEL

Con el objetivo de facilitar el proceso de selección de una unidad de bombeo mecánico, se ha desarrollado un programa en Excel que recibe entre 12 y 13 datos y entrega un listado de modelos de unidades de bombeo mecánico jerarquizados de acuerdo con un ponderado obtenido como se explicó en el capítulo anterior.

Para que los resultados sean coherentes y la incertidumbre sea mínima se recomienda que los datos ingresados a la entrada del programa sean obtenidos a través de la experiencia en el campo en estudio y no producto de suposiciones.

Se recomienda que el archivo de Excel que contiene el programa sea abierto en la versión de Microsoft Excel 2010 o posteriores.

4.1 DATOS DE ENTRADA

4.1.1. Información requerida. Al abrir el archivo de Excel, el usuario se encontrará con una interfaz que le pedirá ingresar varios datos. La información solicitada está clasificada en 4 secciones que son:

Variables de diseño: Estas variables delimitan las condiciones de diseño bajo las cuales operará la unidad. Estas variables afectan directamente la capacidad de producción de la unidad y son usadas para optimizar el diseño de operación del sistema.

Profundidad de Asentamiento de la Bomba: Hace referencia a la distancia vertical existente entre el lugar en que se asentó la bomba y la superficie. Es usado como

variable de evaluación porque la profundidad máxima de asentamiento de la bomba es uno de los criterios que utiliza el fabricante para limitar la aplicación de la unidad o el modelo. Debe expresarse en pies (ft).

Longitud de stroke en superficie: Hace referencia al desplazamiento transmitido por la unidad de bombeo a la barra lisa durante una carrera o ciclo de bombeo. La longitud de carrera puede influir sobre la vida útil de las varillas y la capacidad de producción de la unidad, aumentándolas al aumentar esta y permitiendo su aplicación a pozos más profundos. La longitud de carrera debe expresarse en pulgadas (in).

Diámetro de Pistón: Junto con la profundidad de asentamiento de la bomba, el diámetro de pistón determina el diseño de la sarta de varillas y en última instancia la carga que puede soportar esta. Se debe suministrar en pulgadas (in).

Caudal de Producción: Es la cantidad total de fluido que se obtiene o se espera obtener del pozo en estudio. Este valor puede ingresarse manualmente o dejar que el programa lo calcule a través de la velocidad de bombeo, el diámetro de pistón y la longitud del stroke. El valor suministrado o calculado por el programa deberá estar expresado en barriles por día (BPD).

Velocidad de Bombeo: Se refiere a la cantidad de carreras o Stokes que realiza la unidad en un minuto. Influyen sobre el llenado de la bomba y la carga dinámica sobre la sarta, lo que aumenta la vida útil de la sarta y de la unidad. Puede ingresarse el dato o permitir que el programa lo calcule. Debe proporcionarse en Stokes o golpes por minuto (spm).

Carga Total en Barra Pulida: Hace referencia al peso que debe soportar la barra lisa y que incluye la carga de fluido y el peso de la sarta de varillas. Limita el diseño de la unidad y tiende a reducir la eficiencia de volumétrica de la bomba. El programa calcula la carga total a partir de otras variables y la respuesta la entrega en libras (lb).

Tipo de Varilla: Aunque tradicionalmente se han usados varillas API, actualmente existen en el mercado varillas hechas de otros materiales que eliminan o mejoran algunos de los inconvenientes presentados cuando se usan varillas API y reducen la carga sobre la barra pulida. El programa permite seleccionar uno de los tres tipos de varillas más comunes: API, Corods o Fiberglass.

Diámetro/Número de Varilla: Influye directamente sobre el diámetro del pistón y el peso de la sarta de varillas. El programa permite seleccionar un número de varilla, en el caso de las varillas API, o un diámetro para las de tipo Corods y Fiberglass. El diámetro de varilla se expresa en pulgadas (in) mientras que el número de varilla API es un entero adimensional.

La sección “Variables de Diseño” puede verse en la figura 18 tal como aparece en el programa.

Figura 18. Interfaz de usuario, Variables de Diseño

VARIABLES DE DISEÑO	
Profundidad de asentamiento de la bomba (ft)	5305
Diámetro de Pistón (in)	1,5
Caudal de Producción (BPD)	100

TIPO DE VARILLA	
Tipo de Varillas	<input checked="" type="radio"/> API Rods <input type="radio"/> Corods <input type="radio"/> Fiberglass Rods
Número varilla API	76
Grado Varilla API	D

Características de Fluido: Las variables agrupadas en esta sección son propias de cada fluido y se usaron para determinar la carga de este sobre la bomba y la eficiencia de llenado.

Gravedad API: Con esta variable se clasifica el crudo como liviano, mediano o pesado. En el programa se usa para hallar la gravedad específica del aceite y con ella determinar la gravedad específica de la mezcla de fluidos producidos involucrada en el cálculo del peso del fluido sobre la bomba. Se expresa en grados API (°API).

Corte de Agua: Indica la cantidad de agua que se está produciendo en superficie. Debe ser un valor representativo del pozo y no el resultado de una anomalía temporal. Es usado en el programa para calcular la gravedad específica de la mezcla de fluidos producida y a través de esta encontrar la carga del fluido sobre el pistón. Se reporta en porcentaje (%).

Viscosidad en fondo: Es la viscosidad que tiene el crudo a la entrada de la bomba. Esta variable afecta la eficiencia de llenado de la bomba y por tanto la capacidad de producción de la unidad. El programa la calcula internamente y el resultado lo reporta en centipoises (cp).

Facilidades de Superficie: Describe las características de la locación en que operará la unidad de bombeo mecánico.

Locación: Describe la ubicación geográfica del campo en el que se instalará la unidad, haciendo referencia a tierra firme (Onshore) o costa afuera (Offshore).

Espacio disponible en superficie: Se refiere al espacio con que se cuenta para instalar la unidad, teniendo en cuenta que la mayoría de ellas necesitará mayor espacio para su instalación con grúa. Esta opción sólo estará habilitada si el usuario ha seleccionado una Locación Onshore. Se expresa en metros cuadrados (m²).

Tipo de plataforma: Es una lista desplegable que se habilita al seleccionar Locación Offshore. Muestra tres tipos de plataforma que se usan para producción de hidrocarburos costa afuera.

Disponibilidad de energía eléctrica: Hace referencia a si existe o no una fuente de energía eléctrica en el campo en el que se ubicará la unidad o relativamente cerca.

Las secciones “Características de Fluido” y “Facilidades de Superficie” se ilustran en la figura 19.

Figura 19. Interfaz de usuario, Características de Fluido y Facilidades de Superficie

The screenshot displays a user interface with two main sections: "CARACTERÍSTICAS DEL FLUIDO" and "FACILIDADES DE SUPERFICIE".

CARACTERÍSTICAS DEL FLUIDO

Gravedad API (°API)	33,5
Corte de agua (%)	94,14
Viscosidad en fondo (cP)	2,8

FACILIDADES DE SUPERFICIE

Locación: Onshore Offshore

Espacio disponible en superficie (m²): 3000 - 5000

Disponibilidad de energía eléctrica: SI

At the bottom of the interface, there are three buttons: "MANUAL DE USUARIO", "UNIDADES", and "RESULTADOS".

Unidades disponibles en bodega: Esta sección permite al usuario identificar mediante imágenes las unidades de bombeo mecánico involucradas en el programa y especificar las que tiene a su alcance. Esto lo ayudará a la hora de tomar su decisión.

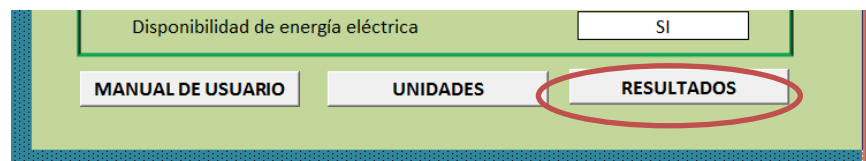
4.1.2. Ingreso de datos. El programa cuenta con varias opciones para recibir los datos, aunque la mayoría de ellos se deben ingresar manualmente. Los diámetros de varillas y de pistón, así como el espacio disponible en superficie y el tipo de plataforma se seleccionan de una lista desplegable. Tres de las variables cuentan con botones de selección con única respuesta.

Por último, los valores de viscosidad son llenados automáticamente con cálculos que realiza el programa internamente de acuerdo con la información que el usuario va suministrando.

4.2 EVALUACIÓN Y SELECCIÓN DE LA UBM

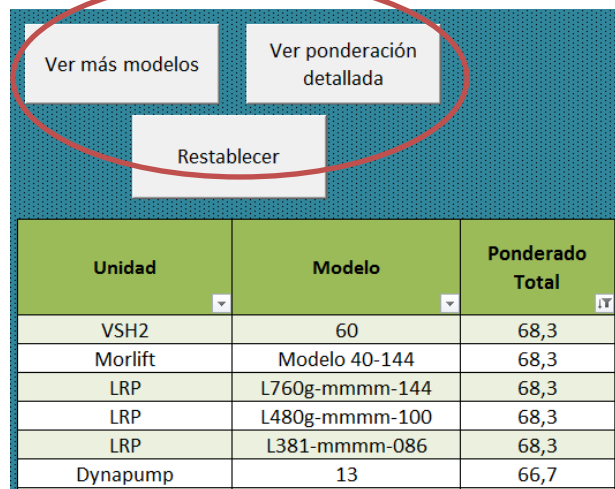
El programa evalúa el desempeño de los diferentes modelos a las condiciones especificadas por el usuario de acuerdo con la metodología de selección explicada en el capítulo anterior. Una vez el usuario termine de suministrar los datos requeridos en la primera hoja del archivo de Excel debe dar click en el botón “Resultados” que se encuentra al final de la hoja. La Figura 20 ilustra la posición de este botón.

Figura 20. Interfaz de usuario, Botón “Resultados”



Una vez presionado el botón, el programa mostrará otra hoja en la que se encuentra la matriz “Resultados”. Allí se relacionan las unidades y modelos con el Ponderado Total obtenidos a través de la metodología anteriormente enunciada. Estos modelos estarán listados de acuerdo con el Ponderado Total, encontrándose en la primera posición el modelo con el ponderado más alto y en el último puesto el modelo con el ponderado más bajo. Lo descrito anteriormente se ilustra en la Figura 21.

Figura 21. Interfaz de usuario, Matriz “Resultados”



Unidad	Modelo	Ponderado Total
VSH2	60	68,3
Morlift	Modelo 40-144	68,3
LRP	L760g-mmmm-144	68,3
LRP	L480g-mmmm-100	68,3
LRP	L381-mmmm-086	68,3
Dynapump	13	66,7

Para hacer que la esta interfaz sea más agradable a la vista se ha programado la matriz para que sólo muestre los 10 modelos con mejor desempeño. Sin embargo, si el usuario desea ver más modelos o conocer el desempeño de los modelos en cada una de las variables de evaluación puede usar los botones “Ver más modelos” y “Ver ponderación detallada” ubicados arriba de las columnas “Unidad” y “Modelo” de la matriz. Si ha usado esto botones y quiere volver la matriz a su estado original, el usuario puede usar el botón “Restablecer”.

4.3 RECURSOS ADICIONALES

4.3.1 Información sobre las Unidades. En la matriz “Resultados”, junto a la columna “Disponible en Bodega”, se encuentra la columna “Ver unidades”. En ella se ha puesto información adicional sobre cada unidad que le permitirá conocer más sobre ella y le ayudará a tomar una decisión en caso de que los Ponderados Totales obtenidos por el programa estén demasiado cercanos.

4.3.2 Manual de usuario. Para acceder al manual de usuario presione el botón “Manual de Usuario” que se encuentra al final de la primera hoja, junto al botón “Resultados”.

5. APLICACIÓN DE LA GUÍA DE SELECCIÓN

Con el objetivo de seleccionar las mejores unidades de bombeo para un pozo determinado y luego diseñar dichas unidades, en el presente trabajo de grado se utilizaron datos de pozos representativos de diferentes campos petroleros colombianos, para la posterior aplicación del programa en Excel desarrollado por los autores, que se explicó en el capítulo anterior, y la realización del diseño de acuerdo con los resultados obtenidos en el programa.

5.1 SELECCIÓN DE POZOS

Se seleccionaron 4 pozos de diferentes campos colombianos, con características y condiciones diferentes, con el objetivo de poder obtener como resultados las diversas unidades de bombeo tanto Convencionales como No-Convencionales a la hora de diseñar.

La información se recolectó de la literatura consultada, así como de diversas compañías consultadas. Por razones de confidencialidad no se refieren los nombres ni la ubicación de los pozos. En la tabla 20 se presenta la información de dichos pozos, dentro la cual se encuentran los parámetros de las variables de diseño, características del fluido, las facilidades de superficie y demás datos requeridos como variables de entrada en el programa desarrollado en Excel por los autores.

5.2 DISEÑO DE LAS UNIDADES

Utilizando como datos de entrada la información de los pozos seleccionados anteriormente, el programa en Excel realizado por los autores arrojó los siguientes

resultados para cada pozo, mostrando así tanto las unidades como modelos más adecuados para ser implementados en cada pozo, teniendo en cuenta las diversas características como se ha mencionado a lo largo de este trabajo

Tabla 20. Información de pozos

POZO	Entrada de la bomba (ft)	Diámetro de Pistón (in)	Qttotal (BPD)	Gravedad API (°API)	Wcut	Gravedad Específica del Agua	Unidad Existente
1	5700	1,75	100	35,8	1,00	1,05	Convencional
2	9682,3	1,5	437	20,5	92,91	0,95	Aerobalanceada
3	4182	3,75	783	20	88,38	0,97	Aerobalanceada
4	6800	1,5	324	33,5	94,14	1,05	Aerobalanceada

Fuente: Guerra, A. Diagnóstico para la adecuación de facilidades de superficie en las estaciones de recolección y tratamiento de crudos pesados y extra pesados de los campos Apiay y Suria en la superintendencia de operaciones Apiay de Ecopetrol s.a.2012. Modificado por los autores.

A continuación, en las figuras 22, 23, 24 y 25 se muestran los diez mejores resultados arrojados por el programa para cada pozo.

Figura 22. Resultados Pozo1

Unidad	Modelo	Eficiencia Energética (Kw)	Ponderado Total
MaxiStroke	LS-180-168	42,86	73,0
LRP	L760g-mmmm-120	42,86	68,3
Morlift	Modelo 40-144	42,86	68,3
LRP	L480g-mmmm-100	42,86	68,3
LRP	L381-mmmm-086	42,86	68,3
Dynapump	13	28,57	66,7
Dynapump	9	28,57	66,7
Dynapump	11	28,57	66,7
MaxiStroke	LS-300-168	42,86	65,1
MaxiStroke	XLS-250-240	42,86	65,1
MaxiStroke	XLS-300-288	42,86	65,1

Figura 23. Resultado Pozo 2

Unidad	Modelo	Eficiencia Energética (Kw)	Ponderado Total
LRP	L760g-mmmm-120	42,86	77,8
Convencional	C-640D-365-168	14,29	73,0
Mark II	M-912D-365-216	14,29	66,7
Mark II	M-1280D-427-216	14,29	66,7
Mark II	M-640D-305-192	14,29	66,7
Aerobalanceada	A-912D-470-240	28,57	61,9
Aerobalanceada	A-1280D-470-240	28,57	61,9
Convencional	C-1280D-305-240	14,29	57,1

Figura 24. Resultados Pozo 3

Unidad	Modelo	Eficiencia Energética (Kw)	Ponderado Total
VSH2	60	42,86	74,6
Morlift	Modelo 40-144	42,86	74,6
MaxiStroke	LS-300-168	42,86	73,0
Corlift	Modelo 30-144	28,57	71,4
LRP	L760g-mmmm-120	42,86	68,3
Dynapump	13	28,57	66,7
Dynapump	9	28,57	66,7
Dynapump	11	28,57	66,7
Convencional	C-640D-365-168	14,29	66,7
Reverse Mark	RM-640D-305-192	14,29	65,1

Figura 25. Resultados Pozo 4

Unidad	Modelo	Eficiencia Energética (Kw)	Ponderado Total
LRP	L480g-mmmm-100	42,86	90,5
MaxiStroke	XLS-250-240	42,86	77,8
LRP	L760g-mmmm-120	42,86	74,6
Convencional	C-320D-256-144	14,29	73,0
Rotaflex	1100	14,29	71,4
Rotaflex	1150	14,29	71,4
Rotaflex	1151	14,29	71,4
MaxiStroke	XLS-300-288	42,86	61,9
Aerobalanceada	A-640D-305-168	28,57	61,9
Aerobalanceada	A-320D-256-120	28,57	61,9

De acuerdo con los resultados arrojados y mostrados anteriormente, se procedió a realizar el diseño de las unidades, con base en el método API RP 11L, el cual a pesar de que cuenta con algunas limitaciones en cuanto a la geometría de las unidades, con algunas suposiciones llega a ser el mejor procedimiento para calcular los parámetros operacionales del bombeo mecánico.

El API RP 11L requiere seguir una serie de pasos principales, con el fin de obtener unos resultados adecuados, estos pasos son:

1. Recolección de datos de entrada, los cuales en este caso fueron los recolectados para cada pozo por medio de la literatura y ayuda de expertos, que fueron mostrados anteriormente.
2. Calculo de los parámetros independientes adimensionales, basados en los datos de entrada. Entre este grupo se encuentran:

N/No = Velocidad de Bombeo adimensional

N/No' = Velocidad de Bombeo adimensional

$F_o/S/kr$ = Elasticidad de la varilla adimensional debido a la carga del fluido

$Wrf/S/ kr$ = Elasticidad de la varilla adimensional debido al efecto boyante del peso de la varilla.

Donde,

N = Velocidad de Bombeo actual, Stokes/minuto

N_o = Velocidad de Bombeo sincrónica para una sarta de varillas recta, Stokes/minuto

N_o' = Velocidad de Bombeo sincrónica para una sarta de varillas No recta, Stokes/minuto

F_o = Carga del fluido en el pistón, lb

S = Longitud del stroke de la varilla, in

kr = Constante elástica de la sarta de varillas, lbs/in

Wrf = Peso de la sarta de varillas boyante, lb

Como las secciones de la sarta están conectadas en series, la constante elástica neta de la sarta total se calcula mediante:

$$\frac{1}{kr} = \sum_{i=1}^N L_i E_{ri} \quad \text{Ecuación 5.1}$$

Donde la constante elástica de la sección de varilla i , se encuentra en la tabla 21.

La carga del fluido en el pistón es calculada con el área bruta de este:

$$F_o = 0.34 H d^2 S_p G_r \quad \text{Ecuación 5.2}$$

Donde,

H = nivel dinámico del fluido, ft

d = diámetro del pistón, in

$S_p G_r$ = Gravedad específica del fluido producido

Tabla 21. Datos más importantes de las varillas API de diferentes tamaños

Tamaño Varilla	Área Metal	Peso en Aire	Constante Elástica
In	in ²	lb/ft	in/(lb ft)
½	0,196	0,726	1,990 E-6
5/8	0,307	1,135	1,270 E-6
¾	0,442	1,634	0,883 E-6
7/8	0,601	2,224	0,649 E-6
1	0,785	2,904	0,497 E-6
1 1/8	0,994	3,676	0,393 E-6
1 ¼	1,227	4,538	0,318 E-6

Fuente. Sucker-Rod Pumping Manual. Modificada por los autores

El peso de la sarta de varillas boyante se encuentra mediante:

$$W_{rf} = W_r (1 - 0.128 S_p G_r) \quad \text{Ecuación 5.3}$$

Donde,

W_r = Peso total de la sarta de varilla en el aire, lb

3. Cálculo de los parámetros dependientes adimensionales, mediante el uso de las cartas de diseño. Estas cartas de diseño que se pueden encontrar en el Anexo B son básicamente las correlaciones resultantes de los parámetros dependientes, en función de las variables independientes tratadas anteriormente.

4. Cálculo de los parámetros operacionales de bombeo, por medio de las variables dependientes. Estos son realizados con base en las cartas de diseño mencionadas anteriormente. El procedimiento es el siguiente:

- Longitud del Stroke del Pistón:

$$S_p = S \frac{S_p}{S} \quad \text{Ecuación 5.4}$$

Donde,

S_p = Longitud de stroke del pistón en el fondo de pozo, in

S_p/S = Variable dependiente, leída de las cartas (ver ANEXO B)

S = Longitud de stroke de la varilla pulida, in

Si la tubería no es recta, la elongación de la tubería debido a la carga del fluido disminuye el stroke del pistón, por lo tanto:

$$S_p = S \frac{S_p}{S} - \frac{F_o}{k_t} \quad \text{Ecuación 5.5}$$

Para esta clase de tubería, la constante elástica es calculada mediante:

$$k_t = \frac{1}{E_t L} \quad \text{Ecuación 5.6}$$

Donde,

L = Profundidad de asentamiento de la bomba, ft

Et se lee de la tabla 22.

Tabla 22. Constantes elásticas y otros datos básicos tuberías API de diferentes tamaños

Tamaño Tubing	Diámetro Externo	Diámetro Interno	Área Metal	Constante Elástica
In	in	in	in ²	in/(lb ft)
1,9	1,9	1,61	0,8	0,500 E-6
2,375	2,375	1,995	1,304	0,307 E-6
2,875	2,875	2,441	1,812	0,221 E-6
3,5	3,5	2,992	2,59	0,154 E-6
4	4,0	3,476	3,077	0,130 E-6
4,5	4,5	3,958	3,601	0,111 E-6

Fuente. Sucker-Rod Pumping Manual. Modificada por los autores.

- Desplazamiento del Pistón: Se basa en una eficiencia de llenado del 100%, el volumen desplazado por la bomba puede ser calculado basado en la longitud de stroke del pistón:

$$PD = 0.1166 d^2 S_p N \quad \text{Ecuación 5.7}$$

Donde,

PD = desplazamiento de la bomba, bpd

d = tamaño del pistón, in

- Carga Varilla Pulida: Las cargas mínimas y máximas de ruptura de la varilla pulida durante el ciclo de bombeo son calculadas mediante:

$$PPRL = W_{rf} + \frac{F1}{S k_r} S k_r \quad \text{Ecuación 5.8}$$

$$MPRL = W_{rf} - \frac{F2}{S k_r} S k_r \quad \text{Ecuación 5.9}$$

Donde,

PPRL = Carga máxima de ruptura de varilla pulida, lb

MPRL = Carga mínima de la varilla pulida, lb

F1/S/k_r y F2/S/k_r son variables dependientes leídas de las cartas. (ver ANEXO B)

- Potencia Varilla Pulida: La potencia requerida para manejar la barra pulida es dada por:

$$PRHP = 2.53 \times 10^{-6} \frac{F_3}{S K_r} S^2 N K_r \quad \text{Ecuación 5.10}$$

Donde,

PRHP = Potencia de la varilla pulida, HP

$F_3/S/k_r$ = variable dependiente leída en cartas (ver ANEXO B)

- Torque neto máximo: El torque neto máximo de un reductor de velocidad es calculado asumiendo una unidad de bombeo balanceada. Por lo tanto, el efecto de contrabalanceo actual de la varilla pulida se asume que es igual al valor ideal dado por:

$$CBE = 1.06 (W_{rf} + 0.5 F_o) \quad \text{Ecuación 5.11}$$

Donde,

CBE = efecto de contrabalanceo ideal de la varilla pulida, lb

Bajo estas condiciones, el torque neto máximo es calculado por:

$$PT = \frac{2T}{S^2 K_r} \frac{S^2}{2} K_r \left[1 + \left(\frac{W_{rf}}{S K_r} - 0.3 \right) \frac{T_a}{10} \right] \quad \text{Ecuación 5.12}$$

Donde,

PT = Torque neto máximo en el reductor de velocidad, lb

$2T/S^2/K_r$ = variable dependiente leída de las cartas (ver ANEXO B)

$W_{rf} / S / K_r$ = variable independiente adimensional

T_a = Factor de ajuste del torque leído de las cartas (ver ANEXO B)

Para tener cálculos más precisos, se han realizado diversas mejoras al modelo RP 11L, entre las principales consideraciones realizadas se encuentran la geometría de la unidad de bombeo, teniendo en cuenta las No convencionales, esto fue propuesto por Lufkin. En los anexos del presente trabajo, se puede encontrar las

ecuaciones mejoradas para las unidades balanceadas por aire y para las Mark II. Estas aproximaciones proveen un rápido camino para estimar los efectos de usar diferentes geometrías de unidades de bombeo en el mismo pozo, y son usadas ampliamente con este propósito específico.

Para realizar los diseños de las mejores Unidades arrojadas por el programa para cada pozo en cuestión se utilizó el software libre QROd3.0 de la empresa Echometer.

A continuación, se presenta el diseño del sistema de bombeo mecánico realizado para el pozo número 2. De acuerdo con el programa las cuatro unidades que lograrían un mejor desempeño de este pozo en orden descendente son: LRP, Mark II, Aerobalanceada y Convencional. Los datos de entrada necesarios para la corrida son los siguientes:

Tabla 23. Datos de entrada, pozo 2, para correr el Qrod

Variable	Valor
Profundidad de la bomba, ft	9682,3
Diámetro de pistón, in	1,5
Longitud de carrera de la unidad, in	137,445
Diámetro de la tubería	3,5"OD
Sarta de Varillas	76 grado D
Gravedad API, °API	20,5
Corte de Agua, %	92,91
Gravedad Específica del Agua	0,95
Presión de la tubería, psi	90
Presión del revestidor, psi	19,4
Eficiencia de la bomba, %	95
Producción objetivo, BPD	437

Fuente: Guerra, A. Diagnóstico para la adecuación de facilidades de superficie en las estaciones de recolección y tratamiento de crudos pesados y extra pesados de los campos Apiay y Suria en la superintendencia de operaciones Apiay de Ecopetrol s.a.2012. Modificado por los autores.

Para el diseño del sistema de bombeo mecánico con la unidad LRP se tuvo en cuenta que este sistema puede operar a velocidades tan bajas como 1 SPM, lo que quiere decir que se requiere una cantidad mucho menor de Stokes para levantar la misma cantidad de barriles que las unidades convencionales. En la tabla 24 se observa la comparación entre la unidad LRP y las unidades convencionales basada en el caudal de producción a una determinada velocidad de bombeo.

Tabla 24. Comparación de los caudales obtenidos por las unidades a diferentes velocidades de bombeo

Unidad	SPM		
	8	5	3
LRP	30	100	600
Mark II	18,32	57,11	101,09
Aerobalanceada	18,35	57,81	100,93
Convencional	18,36	58,16	103,83

Los resultados de las corridas realizadas en el Qrod se presentan a continuación:

Tabla 25. Resultados de las corridas realizadas en el Qrod

Unidad	LRP	Convencional	Aerobalanceada	Mark II
Tipo de Unidad	L760g- mmmm-144	C-640D-365- 168	A-912D-470-240	M-640D-305- 192
Producción Objetivo, BPD	437	437	437	437
Longitud máxima de carrera, in	144	168	240	192
Velocidad de Bombeo, spm	3,65	12,68	11,68	11,67
Carrera del pistón, in	120	138	137.445	138
Carga máxima que soporta la barra pulida, lb	44000	36500	47000	30500
PPRL, lb	30918,8	31830,1	30205,1	29874,7
MPRL, lb	8392,9	8770,6	10313,9	9585,4
PRHP, HP	41,89	41,95	40,53	41,18
Capacidad mínima potencia del motor, HP	65,90	141,38	85,76	97,56

Para determinar el consumo energético de las unidades se desarrolló el siguiente procedimiento:

1. Se realizó un análisis de sensibilidad con numerosas corridas del Qrod y con los valores de potencia requerida en la barra pulida (PRHP) y la capacidad mínima de potencia del motor obtenidos en el software para cada una de las unidades convencionales se calculó la eficiencia mecánica de cada unidad. La eficiencia mecánica de las unidades no convencionales fue obtenida de literatura. En la siguiente tabla, se muestran las eficiencias mecánicas de cada unidad.

Tabla 26. Eficiencia Mecánica de las unidades de bombeo mecánico

Unidad	C	A	BP	MII	RM	LP	R	ML	CL	D	VSH2	LRP	CRP	MS
Eficiencia	0,54	0,65	0,57	0,58	0,58	0,57	0,61	0,78	0,67	0,66	0,8	0,96	0,76	0,76

2. Se calculó la potencia que entra a la unidad proveniente del motor basándose en la siguiente ecuación:

$$\eta_{mech} = \frac{PRHP}{HP_{out\ mot}} \quad \text{Ecuación 5.13}$$

Donde,

η_{mech} : eficiencia mecánica de la unidad de bombeo, fracción

$PRHP$: potencia requerida por la barra pulida, HP.

$HP_{out\ mot}$: potencia que entra a la unidad proveniente del motor, HP

Despejando $HP_{out\ mot}$ se obtiene:

$$HP_{out\ mot} = \frac{PRHP}{\eta_{mech}} \quad \text{Ecuación 5.14}$$

Los valores de PRHP para las unidades no convencionales fueron determinados a partir de datos de literatura. Los resultados obtenidos se presentan en la siguiente tabla:

Tabla 27. Potencia que entra a cada unidad proveniente del motor

Unidad	C	A	BP	MII	RM	LP	R	ML	CL	D	VSH2	LRP	MS
PRHP, HP	41,95	40,56	41,7	41,26	41,86	41,93	40,8	34,55	30,52	30,89	44,12	40,91	35,09
HP out motor	73,60	62,40	73,16	71,14	72,17	73,56	66,88	44,30	45,55	46,81	55,15	42,62	46,17

3. Se determinó la potencia de entrada al motor, asumiendo una eficiencia el motor del 89% con la siguiente ecuación:

$$\eta_{mot} = \frac{HP_{out\ mot}}{HP_{in\ mot}} \quad \text{Ecuación 5.15}$$

Donde,

η_{mot} : eficiencia del motor, fracción

$HP_{in\ mot}$: potencia que entra a la unidad proveniente del motor, HP

Despejando $HP_{in\ mot}$ se obtiene:

$$HP_{in\ mot} = \frac{HP_{out\ mot}}{\eta_{mot}} \quad \text{Ecuación 5.16}$$

Los resultados obtenidos se presentan en la siguiente tabla:

Tabla 28. Potencia que entra a la unidad proveniente del motor

Unidad	C	A	BP	MII	RM	LP	R	ML	CL	D	VSH2	LRP	MS
$HP_{in\ mot}$	82,70	70,11	82,20	80,61	81,09	82,65	75,15	49,78	51,18	52,59	49,08	47,88	51,88

4. Con el fin de conocer los Kwh/día que requeriría cada unidad se realizó la siguiente conversión:

$$HP_{in\ mot} = \frac{Kw}{0,746} \quad \text{Ecuación 5.17}$$

Despejando Kw se obtiene:

$$Kw = 0,746 \times HP_{in\ mot} \times \frac{24\ horas}{1\ día} \quad \text{Ecuación 5.18}$$

Los resultados se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 29. Potencia que entra a la unidad proveniente del motor

Unidad	C	A	BP	MII	RM	LP	R	ML	CL	D	VSH 2	LRP	MS
Kwh /día	1480,7	1255,3	1471,7	1443,2	1451,8	1479,8	1345,49	891,26	916,4	941,5	878,7	857,3	928,9

5. Finalmente se calculó la eficiencia del sistema usando la siguiente ecuación:

$$\eta_{syst} = \frac{Q * \left(H - \frac{PIP}{0,433 * SG} \right) * SG * 7,368 * 10^{-6}}{PRHP} \quad \text{Ecuación 5.19}$$

Donde,

PIP es la presión de entrada a la bomba, psi.

Los resultados se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 30. Eficiencia del sistema con cada unidad

Unidad	C	A	BP	MII	RM	LP	R	ML	CL	D	VSH2	LRP	MS
$\eta_{syst}, \%$	69,71	72,10	70,13	70,88	70,88	69,75	71,68	84,64	95,82	94,67	66,28	71,49	83,34

5.3 ANÁLISIS DE RESULTADOS

En esta sección se analizaron los resultados obtenidos en los diseños realizados para cada uno de los pozos en consideración. Esto se muestra en las tablas 31, 32, 33 y 34.

Tabla 31. Resultados Pozo 1

Unidad	MaxiStroke	LRP	Morlift	Dynapump
Tipo de Unidad	LS-180-168	L760-mmmm-144	40-144	9
Producción Objetivo, BPD	100	100	100	100
Longitud máxima de carrera, in	168	144	144	288
Velocidad de Bombeo, spm	3,54	3,54	3,55	3,54
Carrera del pistón, in	120	120	120	120
Carga máxima que soporta la barra pulida, lb	18000	44000	40000	40000
PPRL, lb	15639,6	15639,6	15653,2	15638,8
MPRL, lb	8275,5	8275,5	8275,2	8275,5
PRHP, HP	4,56	4,56	4,58	4,56
Capacidad mínima potencia del motor, HP	8,10	6,41	7,93	9,33

Fuente: ECHOMETER COMPANY. Echometer Qrod Software. (Programa de computador). Modificado por los autores.

Tabla 32. Resultados Pozo 2

Unidad	LRP	Convencional	Aerobalanceada	Mark II
Tipo de Unidad	L760g-mmmm-144	C-640D-365-168	A-912D-470-240	M-640D-305-192
Producción Objetivo, BPD	437	437	437	437
Longitud máxima de carrera, in	144	168	240	192
Velocidad de Bombeo, spm	3,65	12,68	11,68	11,67
Carrera del pistón, in	120	138	137.445	138
Carga máxima que soporta la barra pulida, lb	44000	36500	47000	30500
PPRL, lb	30918,8	31830,1	30205,1	29874,7
MPRL, lb	8392,9	8770,6	10313,9	9585,4
PRHP, HP	41,89	41,95	40,53	41,18
Capacidad mínima potencia del motor, HP	65,90	141,38	85,76	97,56

Fuente: ECHOMETER COMPANY. Echometer Qrod Software. (Programa de computador). Modificado por los autores.

Tabla 33. Resultados Pozo 3

Unidad	VSH2	Morlift	MaxiStroke	Corlift
Tipo de Unidad	60	40-144	LS-300-168	30-144
Producción Objetivo, BPD	783	783	783	783
Longitud máxima de carrera, in	60	144	168	144
Velocidad de Bombeo, spm	5,66	11,85	11,85	11,85
Carrera del pistón, in	74,08	100	100	100
Carga máxima que soporta la barra pulida, lb	35000	40000	30000	30000
PPRL, lb	32488,0	32482,3	28873	28566
MPRL, lb	4021,7	4016,1	4016,1	4016,1
PRHP, HP	29,28	29,27	29,27	29,27
Capacidad mínima potencia del motor, HP	68,60	70,34	72,19	81,88

Fuente: ECHOMETER COMPANY. Echometer Qrod Software. (Programa de computador). Modificado por los autores.

Tabla 34. Resultados Pozo 4

Unidad	LRP	MaxiStroke	Convencional	Rotaflex
Tipo de Unidad	L480g-mmmm-100	XLS-250-240	C-320D-256-144	1100
Producción Objetivo, BPD	324	324	324	324
Longitud máxima de carrera, in	100	240	144	306
Velocidad de Bombeo, spm	2,71	10,87	10,72	1,43
Carrera del pistón, in	85,52	144	144	265,54
Carga máxima que soporta la barra pulida, lb	28000	25000	25600	50000
PPRL, lb	21454,7	22069,9	20590,1	22221,68
MPRL, lb	4929,7	6231,8	5484,6	11741,97
PRHP, HP	24,91	24,81	24,57	19,76
Capacidad mínima potencia del motor, HP	53,02	55,44	89,79	9,69

Fuente: ECHOMETER COMPANY. Echometer Qrod Software. (Programa de computador). Modificado por los autores.

Analizando los resultados obtenidos y comparando las cuatro unidades de bombeo mecánico con mejor desempeño en cada pozo, de acuerdo con el programa desarrollado, se observa lo siguiente:

- Las unidades no convencionales tienen un mejor desempeño y así mismo pueden lograr un sistema más eficiente que las unidades no convencionales, obteniendo una mayor producción con un gasto energético menor.
- Las unidades no convencionales pueden operar a menores velocidades de bombeo y obtener resultados similares o mejores que los de una unidad convencional. La baja velocidad de bombeo ayuda a prolongar la vida útil del equipo de fondo lo que a la vez reduce los costos operacionales.
- Además de los factores considerados durante el diseño, existen otros de gran importancia como la vida útil del equipo de fondo, la velocidad de subida y bajada de la bomba, la eficiencia de llenado de la bomba y el recorrido de la Unidad. Estos factores también deben considerarse a la hora de evaluar cual unidad tendría un mejor desempeño de acuerdo con las condiciones de cada pozo.
- Durante las simulaciones se observó que la carga sobre la varilla sobrepasa el 100% para ciertos pozos. Esto puede reducir seriamente la vida útil de la caja de engranajes.
- Se observó que la unidad de bombeo que opera actualmente en cada pozo está incluida dentro de la lista arrojada por el programa desarrollado, algunas veces ocupando un lugar destacado, sin embargo, se puede lograr un mejor desempeño del pozo utilizando una unidad no convencional, si esta está disponible.
- Para los 4 pozos contemplados en el presente trabajo de grado, la unidad más adecuada sería una no convencional, por lo cual con su implementación se incrementarían significativamente las ganancias de la producción de cada pozo, y su versatilidad permitiría la realización de diferentes pruebas de pozo con ella, así como su mantenimiento sería menos frecuente y más económico.

6. CONCLUSIONES

- Seleccionar la unidad más adecuada para cada pozo específico es necesario para lograr obtener una mayor eficiencia de dicho pozo, así como para que la unidad de bombeo alcance su máxima eficiencia y su vida útil sea mayor, y evitar así costos adicionales.
- El uso de unidades de bombeo mecánico no convencionales permite alcanzar el mismo caudal de producción obtenido por una unidad convencional con una disminución de hasta el 30% del consumo de energía del sistema.
- Las unidades de bombeo mecánico no convencionales pueden alcanzar una eficiencia mayor al 80% mientras que las convencionales se mantienen por debajo del 65% en los pozos considerados durante este proyecto de investigación.
- El 100% de los resultados entregados por el programa desarrollado por los autores demostraron que las unidades no convencionales tienen un mejor desempeño que las unidades convencionales previamente instaladas en los pozos considerados.
- De acuerdo con los resultados obtenidos, la unidad LRP es la de mejor desempeño para el 50% de los casos. Además, el restante 50% muestran a esta unidad en el top 5 de la clasificación entregada por el programa.
- Solamente en el 50% de los casos, la unidad convencional actualmente instalada en cada pozo estudiado se encuentra dentro del Top 10 de unidades de bombeo mecánico con mejor desempeño según la clasificación que entrega el programa.

- Además, las unidades hidráulicas de bombeo mecánico aparecen dentro de las 5 mejores opciones en el 75% de los casos mientras que las unidades convencionales solo lo hacen en el 50%.
- La guía de selección desarrollada es una herramienta que permite al usuario tomar una mejor decisión a la hora de elegir la Unidad de Bombeo Mecánico que va a ser instalada en un pozo específico.

7. RECOMENDACIONES

- Se recomienda realizar un software con una interfaz de fácil manejo para el usuario con base en el programa realizado en Excel por los autores para la selección de la unidad de bombeo más adecuada a cada pozo.
- Se recomienda trabajar en métodos para el diseño de las unidades de bombeo no convencionales, así como la elaboración de software para dichas unidades.
- Se recomienda actualizar las bases de datos de las diversas unidades de bombeo mecánico, y tener en cuenta las unidades de bombeo que no se trabajaron en el presente trabajo de grado.
- Se recomienda la implementación de todos los modelos presentes en cada unidad de bombeo, para un mayor rango de aplicación, puesto a que en el presente trabajo de grado solo se trabajaron los modelos más representativos.
- Se recomienda que se profundice más en el diseño de las unidades de bombeo hidráulicas para las cuales no hay la suficiente información al momento.
- Se recomienda ampliar el rango de aplicación de este proyecto mediante la inclusión de los demás sistemas de levantamiento artificial disponibles en la industria.

BIBLIOGRAFÍA

BROWN, K. E.: "The Technology of Artificial Lift Methods", Vol. 2a, Editorial Pennwell Publishing Company, Tulsa, Oklahoma, 1980.

CELY, A. V.: "Metodología de los escenarios para estudios prospectivos", Revista Ingeniería e Investigación No.44, 1999.

Curso de Producción, Sección 3.0: "Los Pozos de Bombeo Convencionales". Disponible en: <http://educaciones.cubaeduca.cu/medias/pdf/2705.pdf>

ESTRADA, M.: "Estudio y Aplicación de un Programa de Optimización de la Producción en Sistemas de Bombeo Mecánico con Balancín Convencional y Otras Tecnologías en Pozos del Oriente Ecuatoriano". Proyecto de grado. Universidad Central del Ecuador. Quito. 2014.

LAKE L. W.: "Petroleum Engineering Handbook, Volume IV Production Operations Engineering", Society of Petroleum Engineers, U. of Texas at Austin, 2007.

MOLINA, D.: "Evaluación Técnica del Bombeo Mecánico con Rotaflex en el Distrito Amazónico". Proyecto de grado. Universidad Central del Ecuador. Quito. 2013.

MORGAN, J. Tundra Process Solutions Ltd.: "Introduction to Sure Stroke Intelligent Lift". Disponible en:

https://www.albertacanada.com/mexico/images/TUNDRA_CHOJA_presentation_jm_4-30-12_ENG.pdf

PARTIDAS, H.: “Bombeo Mecánico. Optimización, Diagnóstico y Optimización”. Workshop International. Venezuela. 2003.

PEÑA, C.: “Estudio Técnico Financiero para la Implementación de Unidades de Bombeo Mecánico No Convencionales en el Campo La Cira-Infantas”. Proyecto de grado. Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga. 2014.

PÉREZ, M Y CALDERÓN, Z.: “Orientaciones Prácticas para la Elaboración Exitosa de Trabajos de Grado en Ingeniería”. Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga. 2011.

RAGA, J.: “Manual de Selección de Unidades de Bombeo Mecánico del Activo de Producción Poza Rica Región Norte”. Proyecto de grado. Universidad Veracruzana. Poza Rica, Veracruz. 2001.

TAKÁCS, G. PH. D: “Sucker Rod Pumping Manual”, Penn Well Corporation 1421 South Sheridan Road Tulsa, Oklahoma USA. 2003.

TAKÁCS, PH, Gábor, “Modern Sucker-Rod Pumping”, 1992.

VILLEGAS, D.: “Aplicación de un Nuevo Sistema de Bombeo Mecánico No Convencional con Tubería Flexible para la Explotación de Pozos de Crudo Pesado”. Proyecto de grado. Universidad Nacional Autónoma de México. México D.F. 2014.

WEATHERFORD: “Rotaflex Long Strong Pumping Unit”. Houston, Texas. 2007.

ANEXOS

ANEXO A. Metodología API R11L para el pozo 2

Con base en la metodología API R11L mostrada en el capítulo 5, para el pozo 2 se obtuvo los siguientes resultados, los cuales comprueban los resultados arrojados por el programa Qrod.

$$N_o = \frac{245000}{L}$$

$$N_o = \frac{245000}{9537} = 25,30$$

$$N = \frac{Q}{0,1166 \times D^2 \times \eta \times S}$$

$$N = \frac{437}{0,1166 \times 1,5^2 \times 0,95 \times 137,445} = 12,76$$

$$\frac{N}{N_o} = \frac{12,76}{25,30} = 0,5$$

$$N_o' = N_o + N_o \times F_c$$

$$N_o' = 25,03 + 25,3 \times 18,5\% = 29,88$$

$$\frac{N}{N_o'} = \frac{12,76}{29,98} = 0,43$$

La carga del fluido sobre el pistón está determinada por la gravedad específica y el nivel dinámico del fluido y el diámetro del pistón.

$$F_o = 0,34 \times G \times D^2 \times H$$

$$F_o = 0,34 \times 0,97 \times 1,5^2 \times 9682,3$$

$$F_o = 7184,75$$

La constante elástica de la sarta de varillas se encuentra en la tabla.

$$E_r = 0,86 \times 10^{-6} \text{ in/lb-ft.}$$

El estiramiento total de la sarta está relacionado con su constante elástica K_r , su recíproco es:

$$\frac{1}{k_r} = E_r \times L$$

$$\frac{1}{k_r} = 0,804 \times 10^{-6} \times 9537 = 7,67 \times 10^{-3}$$

Esto significa que los 9537 pies de varillas se estirarán $7,67 \times 10^{-3}$ pulgadas por cada libra aplicada sobre ella. Entonces la relación adimensional de estiramiento será:

$$\frac{F_o}{Sk_r} = \frac{7183,75 \times 7,68 \times 10^{-3}}{137,445} = 0,4$$

El peso de las cabillas en el aire (W_r), de acuerdo con datos de la tabla es igual a 1,833 lbs7ft. Entonces, el peso total de la sarta es:

$$W = 9537 \times 1,833 = 17481,32$$

Asumiendo que el pozo está totalmente lleno, la sarta de varillas está sumergida en un fluido con gravedad específica de 0,97 y su peso será inferior debido a la flotabilidad.

$$W_{rf} = W(1 - 0,128G)$$

$$W_{rf} = W(1 - 0,128 \times 0,97) = 15310,84 \text{ lb}$$

Variables adimensionales:

Tabla A.1. Resultados variables adimensionales.

Variable	Valor
N/No	0,50
N/No'	0,42
Fo/Skr	0,40
Sp/S	0,95
F1/Skr	0,84
F2/Skr	0,35
F3/Skr	0,62
2T/(S^2)kr	0,57

$$S_p = S \frac{S_p}{S}$$

$$S_p = 137,445 \times 0,95 = 130,57 \text{ in}$$

$$PD = 0.1166 d^2 S_p N$$

$$PD = 0.1166 \times 1,5^2 \times 130,57 \times 12,76 = 437,09 \text{ BPD}$$

$$PPRL = W_{rf} + \frac{F1}{S k_r} S k_r$$

$$PPRL = 15310,84 + 0,84 \times 137,445 \times \frac{1}{7,67 \times 10^{-3}} = 30363,71 \text{ lb}$$

$$MPRL = W_{rf} - \frac{F2}{S k_r} S k_r$$

$$MPRL = 15310,84 - 0,35 \times 137,445 \times \frac{1}{7,67 \times 10^{-3}} = 9038,81 \text{ lb}$$

$$PRHP = 2.53 \times 10^{-6} \frac{F_3}{S K_r} S^2 N K_r$$

$$PRHP = 2.53 \times 10^{-6} \times 0,62 \times 137,445^2 \times 12,76 \times \frac{1}{7,67 \times 10^{-3}} = 49,30 \text{ HP}$$

$$PPRL = W_{rf} + F_o + 0,85 \left(\frac{F1}{S k_r} S k_r - F_o \right)$$

$$PPRL = 15310,84 + 7184,75 + 0,85 \left(0,84 \times 137,445 \times \frac{1}{7,67 \times 10^{-3}} - 7184,75 \right) \\ = 29183,49 \text{ lb}$$

$$MPRL = 29183,49 - (0,84 + 0,35) \times 137,445 \times \frac{1}{7,67 \times 10^{-3}} = 7858,59 \text{ lb}$$

$$PPRL = 15310,84 + 7184,75 + 0,75 \left(0,84 \times 137,445 \times \frac{1}{7,67 \times 10^{-3}} - 7184,75 \right) \\ = 28396,68 \text{ lb}$$

$$MPRL = 28396,68 - (0,84 + 0,35) \times 137,445 \times \frac{1}{7,67 \times 10^{-3}} = 78071,78 \text{ lb}$$

Unidades Aerobalanceadas

$$PPRL = W_{rf} + F_o + 0,85 \left(\frac{F_1}{S k_r} S k_r - F_o \right)$$

$$MPRL = PPRL - \left(\frac{F_1}{S k_r} + \frac{F_2}{S k_r} \right) S k_r$$

$$CBE = 1,06 \frac{PPRL + MPRL}{2}$$

$$PT = 0,96 \frac{2T}{S^2 k_r} \frac{S^2}{2} k_r \left[1 + \left(\frac{W_{rf}}{S k_r} - 0,3 \right) \frac{T_a}{10} \right]$$

Unidades Mark II

$$PPRL = W_{rf} + F_o + 0,75 \left(\frac{F_1}{S k_r} S k_r - F_o \right)$$

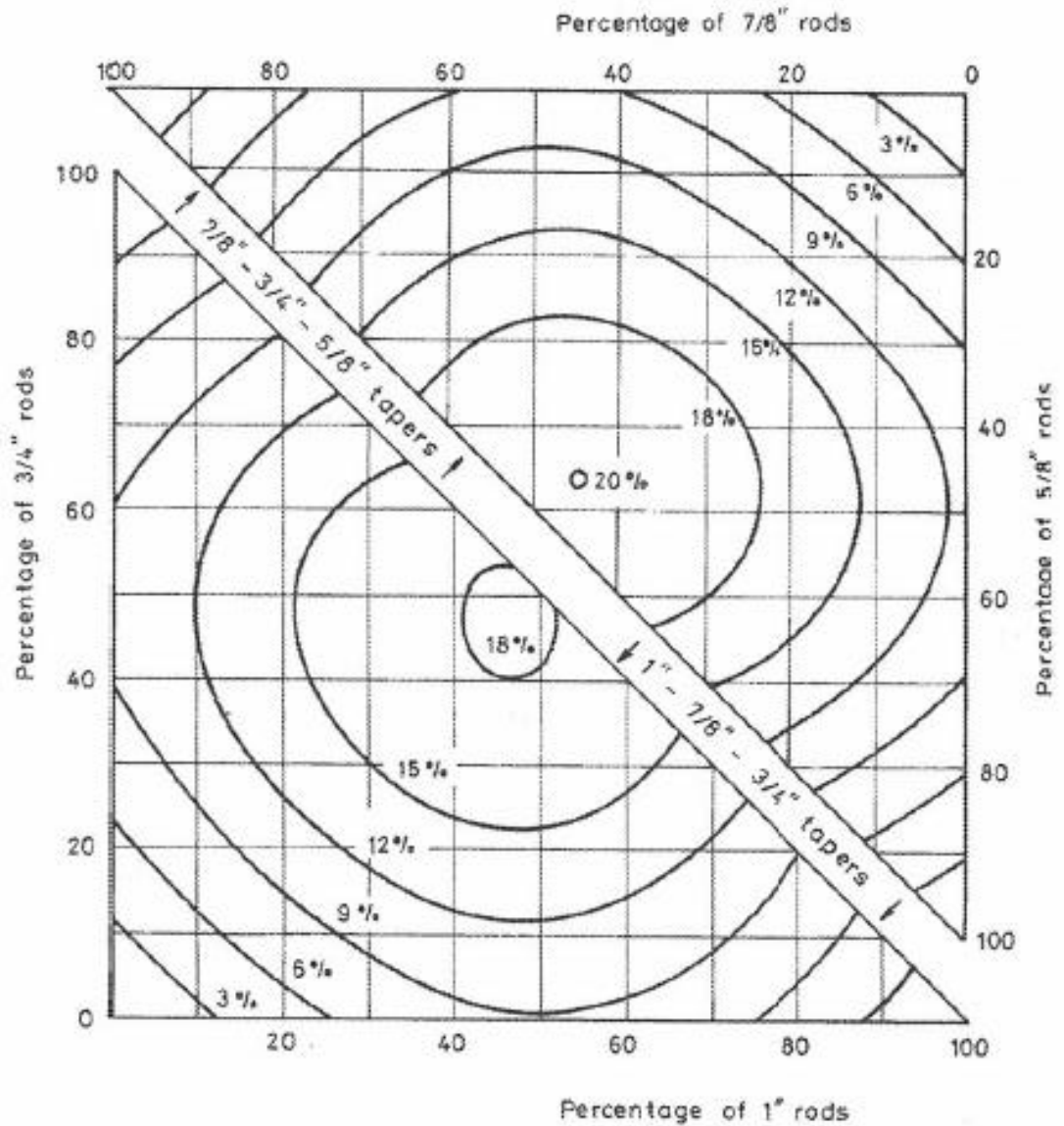
$$MPRL = PPRL - \left(\frac{F_1}{S k_r} + \frac{F_2}{S k_r} \right) S k_r$$

$$CBE = 1,04 \frac{PPRL + 1,25 MPRL}{2}$$

$$PT = (0,93 F_{p \max} - 1,2 F_{p \min}) \frac{S}{4}$$

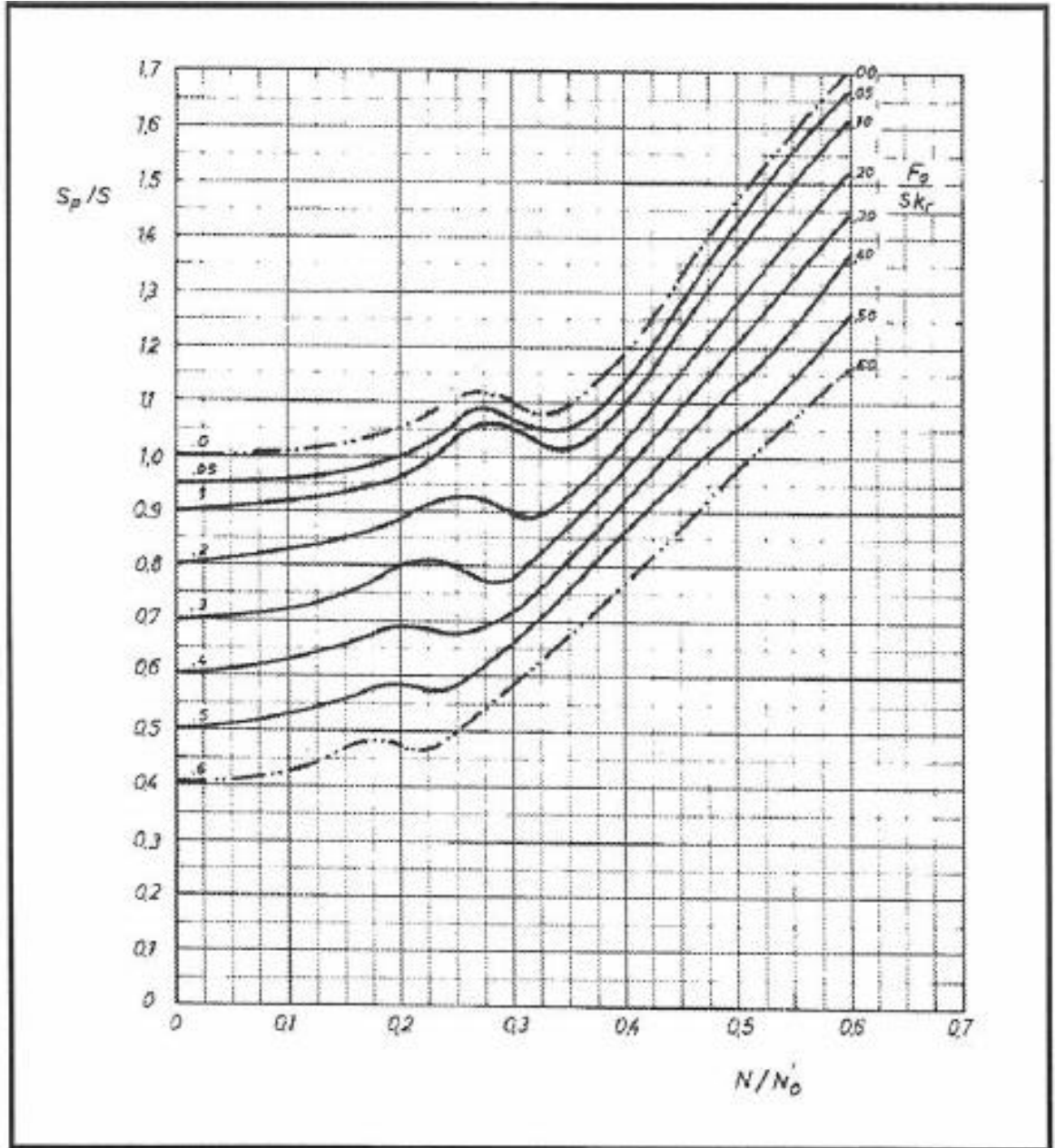
ANEXO B. Cartas de las variables independientes y dependientes para el diseño de las unidades de bombeo

Figura B.1. Frecuencia natural de las cabillas



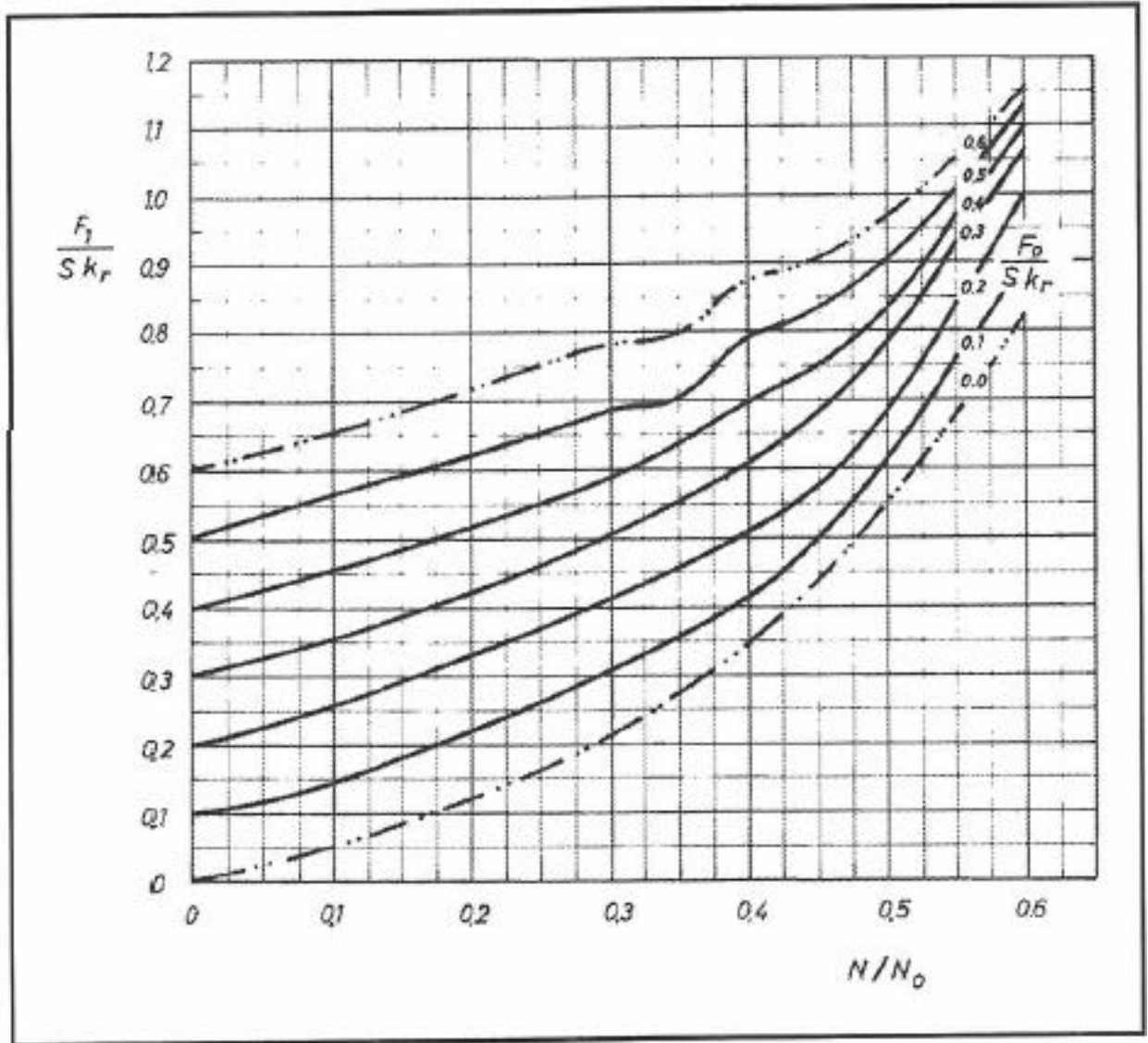
Fuente: Sucker-Rod Pumping Manual.

Figura B.2. Variable dependiente S_p/S



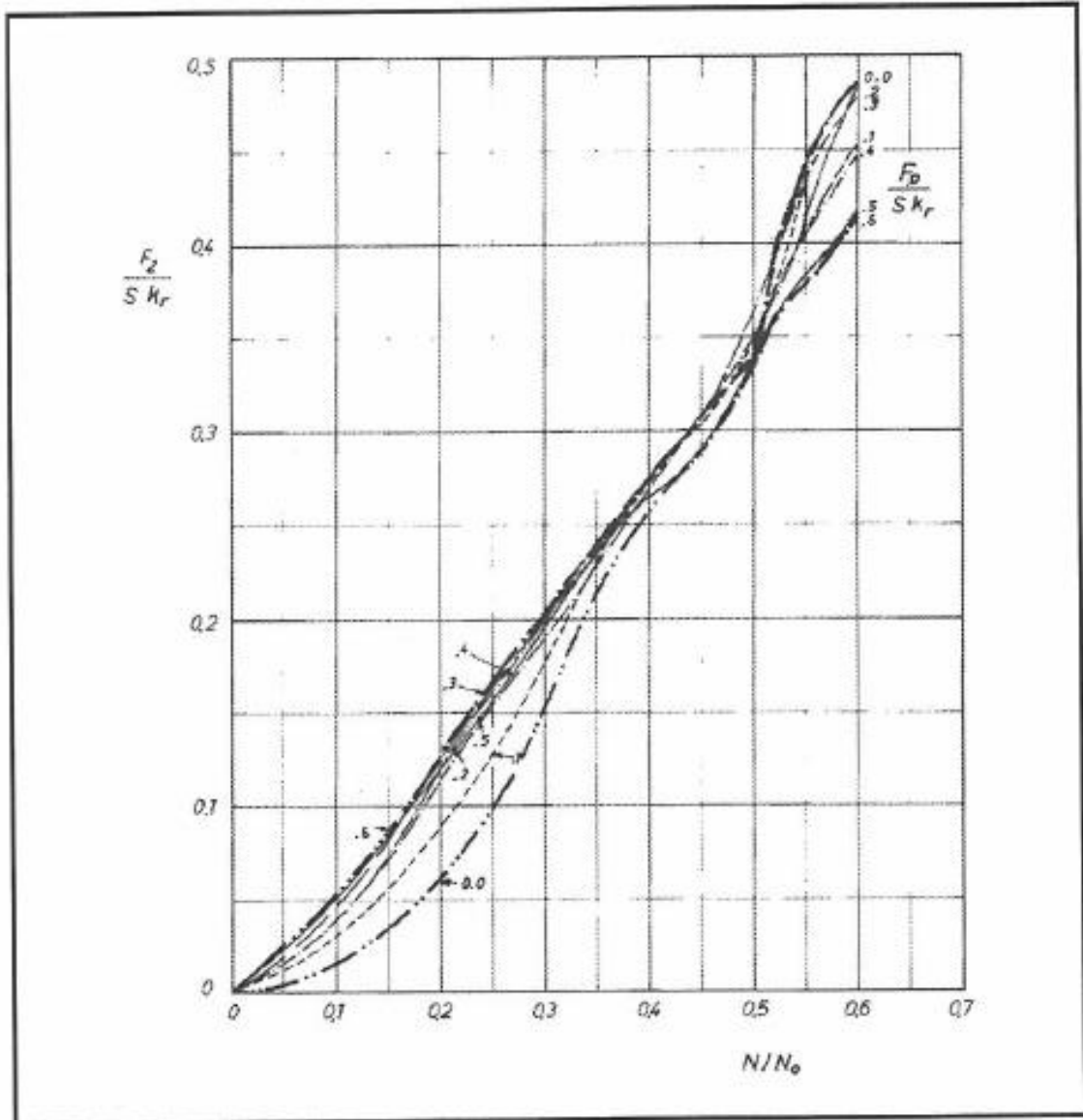
Fuente: Sucker-Rod Pumping Manual.

Figura B.3. Variable dependiente F_1/Sk_r



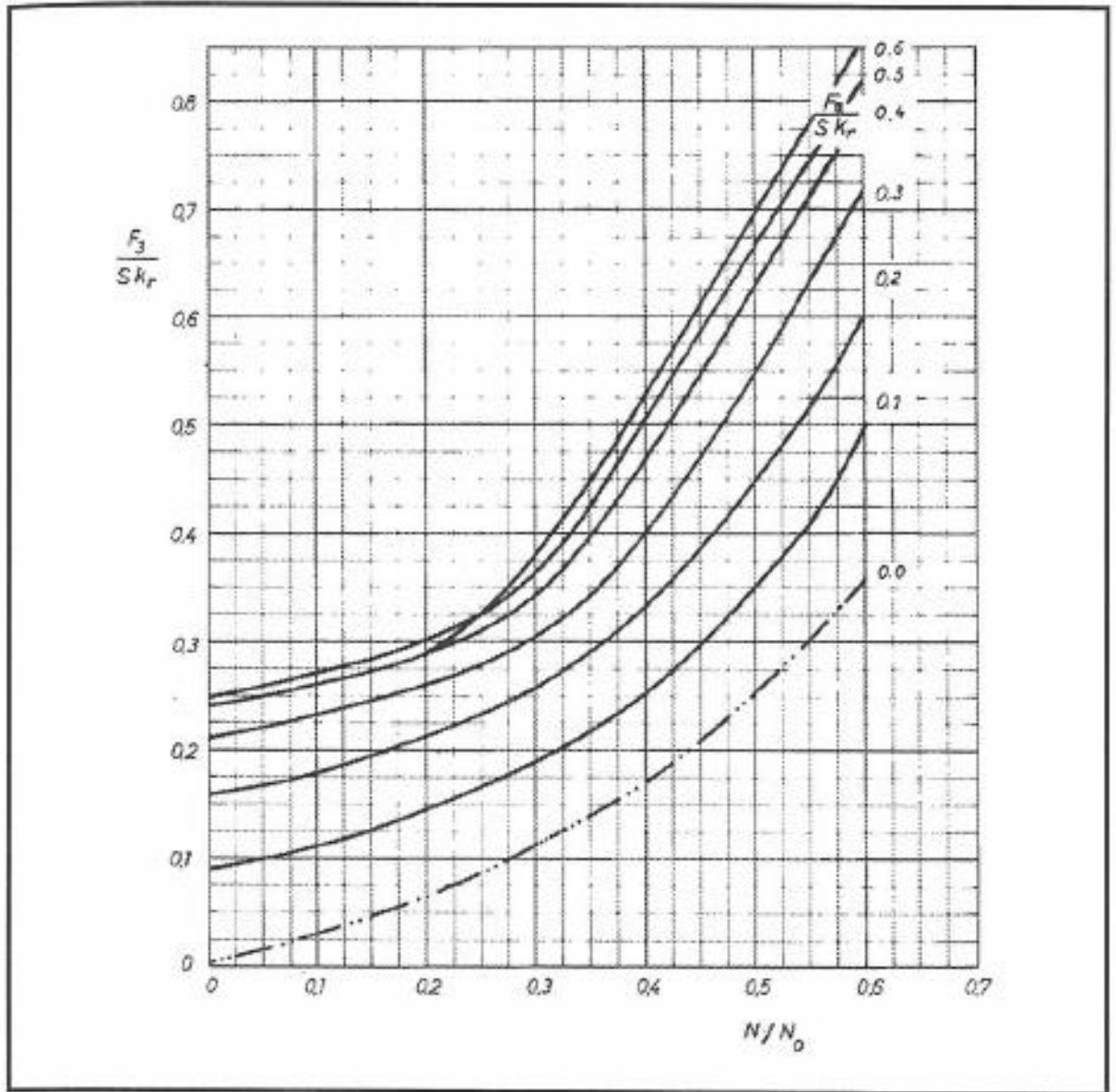
Fuente: Sucker-Rod Pumping Manual.

Figura B.4. Variable dependiente F_2/Sk_r



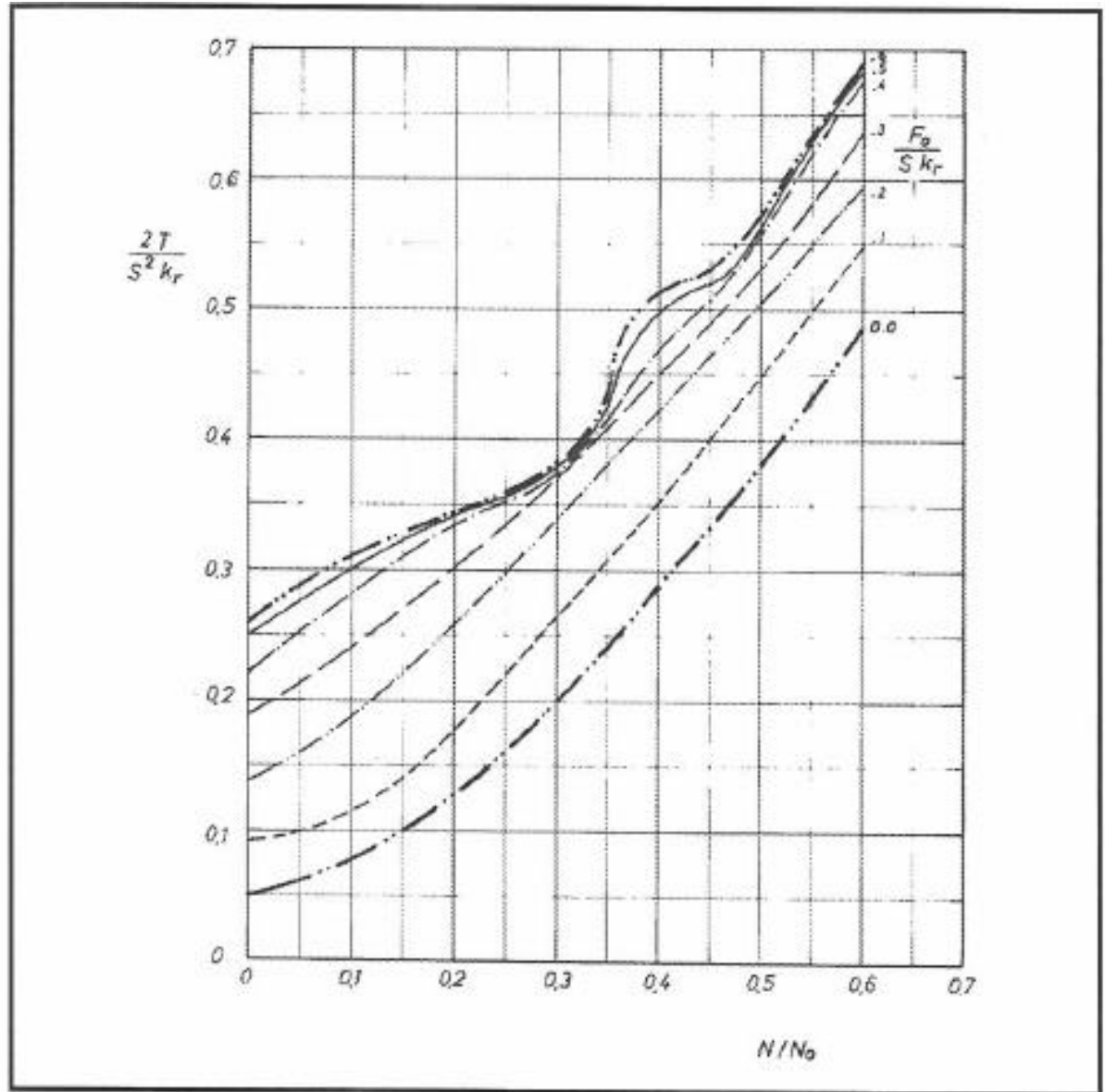
Fuente: Sucker-Rod Pumping Manual.

Figura B.5. Variable dependiente F_3/Sk_r



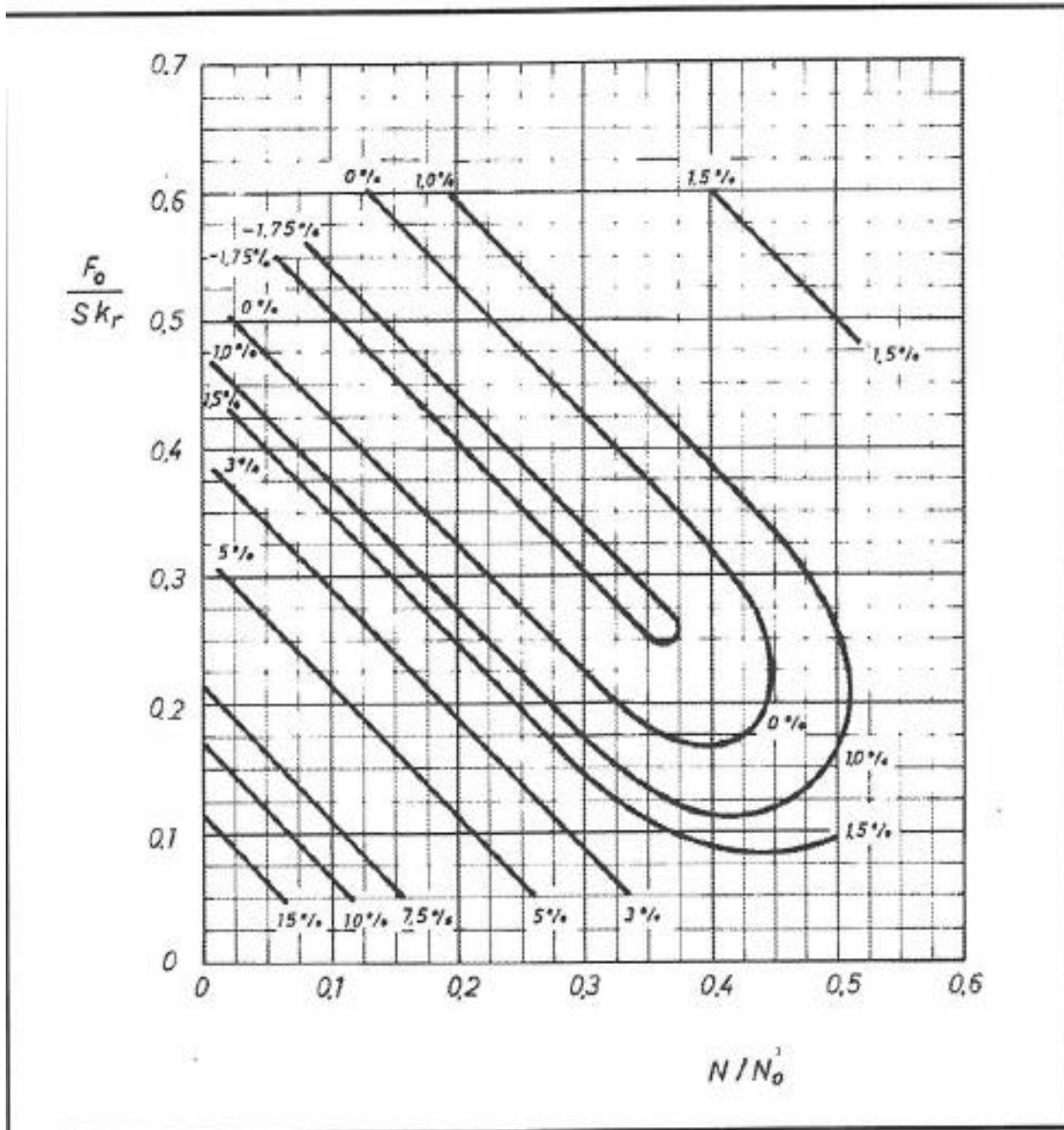
Fuente: Sucker-Rod Pumping Manual.

Figura B.6. Variable dependiente $2T/(S^2kr)$



Fuente: Sucker-Rod Pumping Manual.

Figura B.7. Factor de ajuste del torque.



Fuente. Sucker-Rod Pumping Manual.

ANEXO C. Tablas para las varillas API.

Solid Steel Rods:

- API:

Rod Size	Metal Area	Weight in Air	Elastic Constant	Tub. Dia. Min.	
				Normal (in)	Especial(in)
in	sq in	lb/ft	in/(lb ft)		
1/2	0,196	0,726	0,00000199	-	1,66
5/8	0,307	1,135	0,00000127	2 1/16	1,99
3/4	0,442	1,634	0,000000883	2 3/8	2 1/16
7/8	0,601	2,224	0,000000649	2 7/8	2 3/8
1	0,785	2,904	0,000000497	3 1/2	2 7/8
1 1/8	0,994	3,676	0,000000393	3 1/2	-
1 1/4	1,227	4,538	0,000000318	3 1/2	-

Rod Grade	Composition	Tensile Strength, psi	
		min.	max.
K	AISI 46	85000	115000
C	AISI 1536	90000	115000
D	Carbon or Alloy	115000	140000

- Corods:

Rod Size	Metal Area	Weight in Air	Elastic Constant
in	sq in	lb/ft	in/(lb ft)
11/16	0,371	1,262	0,000001113
	0,442	1,502	0,000000934
13/16	0,519	1,763	0,000000796
7/8	0,601	2,044	0,000000687
15/16	0,69	2,347	0,000000599
1	0,785	2,67	0,000000526
1 1/16	0,887	3,016	0,000000466

- Fiberglass Rods:

Rod Size	Metal Area	Weight in Air	Elastic Constant
in	sq in	lb/ft	in/(lb ft)
3/4	0,442	0,48	0,000004308
7/8	0,601	0,64	0,000003168
1	0,785	0,8	0,000002425
1 1/4	1,227	1,29	0,000001552

- Combinaciones de varillas según el diámetro de pistón de la bomba:

Según diámetro de pistón de la bomba						
Diámetro (in)	3/4 y 7/8	7/8 y 1	3/4, 7/8 y 1	1 y 1 1/8	7/8, 1 y 1/8	
	% 3/4	% 7/8	% 3/4	1%	% 7/8	1%
1 1/2	68,6	74,3	50,5	78,1	588	21,7
1 3/4	65	71,9	44,9	76,5	54,9	23,7
2	60,8	68,1	35,2	74,5	50,5	26
2 1/4	56,1	66	30,8	72,4	45,4	28,7
2 1/2	50,8	62,5	22,5	69,7	39,8	31,7
2 3/4	45	53,6	13,2	67,3	33,5	35
3 1/4	31,6	49,7		61,2	19,2	42,6
3 3/4	16	39,3		54	26	51,4
Nomenclatura de combinación de sarta para el diseño						
66	3/4	88	1	1 1/8		
77	7/8	86	1, 7/8 y 3/4	1 1/8, 1 y 7/8		
76	7/8 y 3/4	87	1 y 7/8	1 1/8 y 1		

- Rod Taper Percentages Recommended in RP11L:

Rod	Plunger Diam., inches	Rod Weight lb per ft	Elastic Constant, in. Per lb ft	Frequency Factor	Rod String, % of each size					
No.	D	Wr	Er	Fc	1 2/3	1	7/8	3/4	5/8	1/2
44	Todos	0,726	1,99E-06	1	-	-	-	-	-	100
54	1,0625	0,908	1,67E-06	1,138	-	-	-	-	44,6	55,4
54	1,25	0,929	1,63E-06	1,14	-	-	-	-	49,5	50,5
54	1,5	0,957	1,58E-06	1,137	-	-	-	-	56,4	43,6
54	1,75	0,99	1,53E-06	1,122	-	-	-	-	64,6	35,4
54	2	1,027	1,46E-06	1,095	-	-	-	-	73,7	26,3
54	2,25	1,067	1,39E-06	1,061	-	-	-	-	83,4	16,6
54	2,5	1,108	1,32E-06	1,023	-	-	-	-	93,5	6,5
55	Todos	1,135	1,27E-06	1	-	-	-	-	100	-
64	1,0625	1,164	1,38E-06	1,229	-	-	-	33,3	33,1	33,5
64	1,25	1,211	1,32E-06	1,215	-	-	-	37,2	35,9	26,9
64	1,5	1,275	1,28E-06	1,184	-	-	-	42,3	40,4	17,3
64	1,75	1,341	1,14E-06	1,145	-	-	-	47,4	45,2	7,4
65	1,0625	1,307	1,14E-06	1,098	-	-	-	34,4	65,6	-
65	1,25	1,321	1,13E-06	1,104	-	-	-	37,3	62,7	-
65	1,5	1,343	1,11E-06	1,11	-	-	-	41,8	58,2	-
65	1,75	1,369	1,09E-06	1,114	-	-	-	46,9	53,1	-
65	2	1,394	1,07E-06	1,114	-	-	-	52	48	-
65	2,25	1,426	1,05E-06	1,11	-	-	-	58,4	41,6	-
65	2,5	1,46	1,02E-06	1,099	-	-	-	65,2	34,8	-
65	2,75	1,497	9,90E-07	1,082	-	-	-	72,5	27,5	-
65	3,25	1,574	9,30E-07	1,037	-	-	-	88,1	11,9	-
66	todos	1,634	8,83E-07	1	-	-	-	100	-	-
75	1,0625	1,566	9,97E-07	1,191	-	-	27	27,4	45,6	-
75	1,25	1,604	9,78E-07	1,193	-	-	29,4	29,8	40,8	-
75	1,5	1,664	9,35E-07	1,189	-	-	33,3	33,3	33,3	-
75	1,75	1,732	8,92E-07	1,174	-	-	37,8	37	25,1	-
75	2	1,803	8,47E-07	1,151	-	-	42,4	41,3	16,3	-

No.	D	Wr	Er	Fc	1 2/3	1	7/8	3/4	5/8	1/2
75	2,25	1,875	8,01E-07	1,121	-	-	46,9	45,8	7,2	-
76	1,0625	1,802	8,16E-07	1,072	-	-	28,5	71,5	-	-
76	1,25	1,814	8,12E-07	1,077	-	-	30,6	69,4	-	-
76	1,5	1,833	8,04E-07	1,082	-	-	33,8	66,2	-	-
76	1,75	1,855	7,95E-07	1,088	-	-	37,5	62,5	-	-
76	2	1,88	7,85E-07	1,093	-	-	41,7	58,8	-	-
76	2,25	1,908	7,74E-07	1,096	-	-	46,5	53,5	-	-
76	2,5	1,934	7,64E-07	1,097	-	-	50,8	49,2	-	-
76	2,75	1,967	7,51E-07	1,094	-	-	56,5	43,5	-	-
76	3,25	2,039	7,22E-07	1,078	-	-	68,7	31,3	-	-
76	3,75	2,119	6,90E-07	1,047	-	-	82,3	17,7	-	-
77	Todo	2,224	6,49E-07	1	-	-	100	-	-	-
85	1,0625	1,883	8,73E-07	1,261	-	22,2	22,4	22,4	33	-
85	1,25	1,943	8,41E-07	1,253	-	23,9	24,2	24,3	27,6	-
85	1,5	2,039	7,91E-07	1,232	-	26,7	27,4	26,8	19,2	-
85	1,75	2,138	7,38E-07	1,201	-	29,6	30,4	29,5	10,5	-
86	1,0625	2,058	7,42E-07	1,151	-	22,6	23	54,3	-	-
86	1,25	2,087	7,32E-07	1,156	-	24,3	24,5	51,2	-	-
86	1,5	2,133	7,17E-07	1,162	-	26,8	27	46,3	-	-
86	1,75	2,185	6,99E-07	1,164	-	29,4	30	40,6	-	-
86	2	2,247	6,79E-07	1,161	-	32,8	33,2	33,9	-	-
86	2,25	2,315	6,56E-07	1,153	-	36,9	36	27,1	-	-
86	2,5	2,385	6,33E-07	1,138	-	40,6	39,7	19,7	-	-
86	2,75	2,455	6,10E-07	1,119	-	44,5	43,3	12,2	-	-
87	1,0625	2,39	6,12E-07	1,055	-	24,3	75,7	-	-	-
87	1,25	2,399	6,10E-07	1,058	-	25,7	74,3	-	-	-
87	1,5	2,413	6,07E-07	1,062	-	27,7	72,3	-	-	-
87	1,75	2,43	6,03E-07	1,066	-	30,3	69,7	-	-	-
87	2	2,45	5,98E-07	1,071	-	33,2	66,8	-	-	-
87	2,25	2,472	5,94E-07	1,075	-	36,4	63,6	-	-	-
87	2,5	2,4966	5,88E-07	1,079	-	39,9	60,1	-	-	-
87	2,75	2,523	5,82E-07	1,082	-	43,9	56,1	-	-	-
87	3,25	2,575	5,70E-07	1,084	-	51,6	48,4	-	-	-
87	3,75	2,641	5,56E-07	1,078	-	61,2	38,8	-	-	-

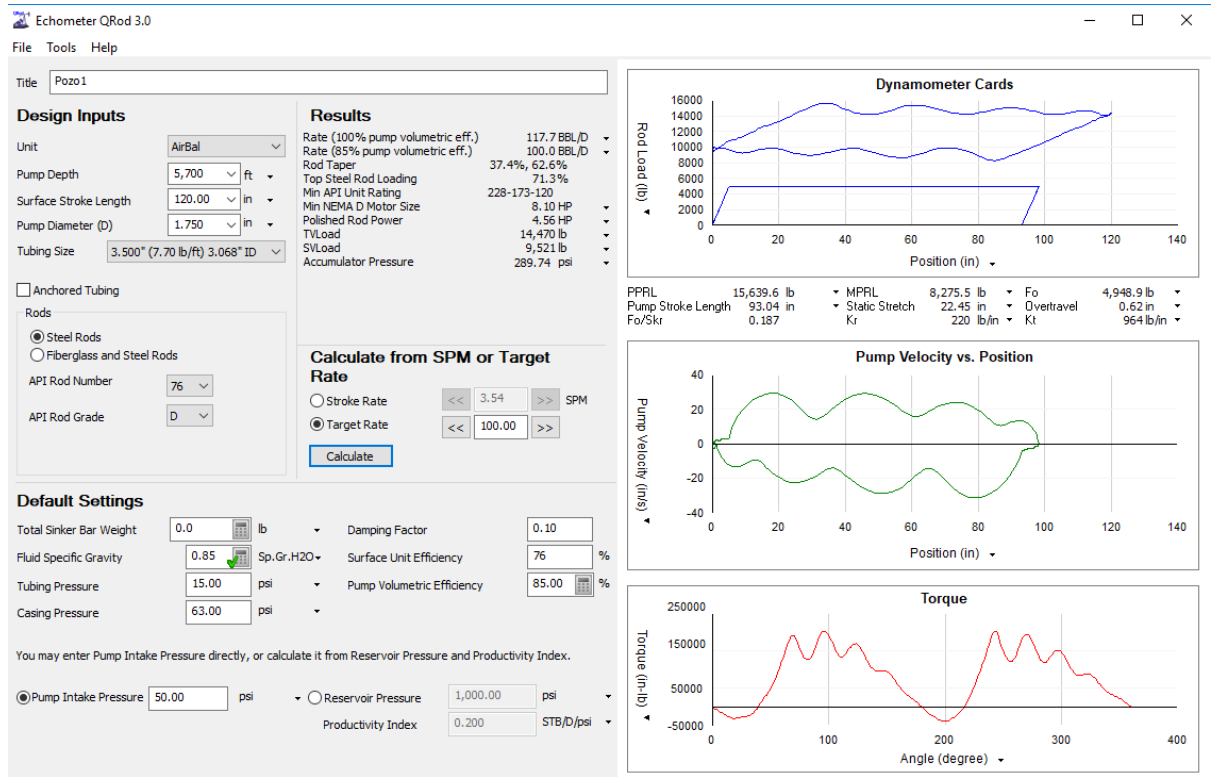
No.	D	Wr	Er	Fc	1 2/3	1	7/8	3/4	5/8	½
87	4,75	2,793	5,22E-07	1,038	-	83,6	16,4	-	-	-
88	Todos	2,904	4,97E-07	1	-	100	-	-	-	-
96	1,0625	2,382	6,70E-07	1,222	19,1	19,2	19,5	42,3	-	-
96	1,25	2,435	6,55E-07	1,224	20,5	20,5	20,7	38,3	-	-
96	1,5	2,511	6,33E-07	1,223	22,4	22,5	22,8	32,3	-	-
96	1,75	2,607	6,06E-07	1,213	24,8	25,1	25,1	25,1	-	-
96	2	2,703	5,78E-07	1,196	27,1	27,9	27,4	17,6	-	-
96	2,25	2,806	5,49E-07	1,172	29,6	30,7	29,8	9,8	-	-
97	1,0624	2,645	5,68E-07	1,12	19,6	20	60,3	-	-	-
97	1,25	2,67	5,63E-07	1,124	20,8	21,2	58	-	-	-
97	1,5	2,707	5,56E-07	1,131	22,5	23	54,5	-	-	-
97	1,75	2,751	5,48E-07	1,137	24,5	25	50,4	-	-	-
97	2	2,801	5,38E-07	1,141	26,8	27,4	45,7	-	-	-
97	2,25	2,856	5,28E-07	1,143	29,4	30,2	40,4	-	-	-
97	2,5	2,921	5,15E-07	1,141	32,5	33,1	34,4	-	-	-
97	2,75	2,989	5,03E-07	1,135	36,1	35,3	28,6	-	-	-
97	3,25	3,132	4,75E-07	1,111	42,9	41,9	15,2	-	-	-
98	1,0625	3,068	4,75E-07	1,043	21,2	78,8	-	-	-	-
98	1,25	3,076	4,74E-07	1,045	22,2	77,8	-	-	-	-
98	1,5	3,089	4,72E-07	1,048	23,8	76,2	-	-	-	-
98	1,75	3,103	4,70E-07	1,051	25,7	74,3	-	-	-	-
98	2	3,118	4,68E-07	1,055	27,7	72,3	-	-	-	-
98	2,25	3,137	4,65E-07	1,058	30,1	69,9	-	-	-	-
98	2,5	3,157	4,63E-07	1,062	32,7	67,3	-	-	-	-
98	2,75	3,18	4,60E-07	1066	35,6	64,4	-	-	-	-
98	3,25	3,231	4,53E-06	1,071	42,2	57,8	-	-	-	-
98	3,75	3,289	4,45E-07	1,074	49,7	50,3	-	-	-	-
98	4,75	3,412	4,28E-07	1,064	65,7	34,4	-	-	-	-
99	Todos	3,676	3,93E-07	1	100	-	-	-	-	-
107	1,0625	2,997	5,24E-07	1,184	16,9	16,8	17,1	49,1	-	-
107	1,25	3,019	5,17E-07	1,189	17,9	17,8	18	46,3	-	-
107	1,5	3,085	5,06E-07	1,195	19,4	19,2	19,5	41,9	-	-
107	1,75	3,158	4,94E-07	1,197	21	21	21,2	36,9	-	-

No.	D	Wr	Er	Fc	1 2/3	1	7/8	3/4	5/8	½
107	2	3,238	4,80E-07	1,195	22,7	22,8	23,1	31,4	-	-
107	2,25	3,336	4,64E-07	1,187	25	25	25	25	-	-
107	2,5	3,435	4,47E-07	1,174	26,9	27,7	27,1	18,2	-	-
107	2,75	3,537	4,30E-07	1,156	29,1	30,2	29,3	11,3	-	-
108	1,0625	3,325	4,47E-07	1,097	17,3	17,8	64,9	-	-	-
108	1,25	3,345	4,45E-07	1,101	18,1	18,6	63,2	-	-	-
108	1,5	3,376	4,41E-07	1,106	19,4	19,9	60,7	-	-	-
108	1,75	3,411	4,37E-07	1,111	20,9	21,4	57,7	-	-	-
108	2	3,452	4,32E-07	1,117	22,6	23	54,3	-	-	-
108	2,25	3,498	4,27E-07	1,121	24,5	25	50,5	-	-	-
108	2,5	3,548	4,21E-07	1,124	26,5	27,2	46,3	-	-	-
108	2,75	3,603	4,15E-07	1,126	28,7	29,6	41,6	-	-	-
108	3,25	3,731	4,00E-07	1,123	34,6	33,9	31,6	-	-	-
108	3,75	3,873	3,83E-07	1,108	40,6	39,5	19,9	-	-	-
109	1,0625	3,839	3,78E-07	1,035	18,9	81,1	-	-	-	-
109	1,25	3,845	3,78E-07	1,036	19,6	80,4	-	-	-	-
109	1,5	3,855	3,77E-07	1,038	20,7	79,3	-	-	-	-
109	1,75	3,867	3,76E-07	1,04	22,1	77,9	-	-	-	-
109	2	3,88	3,75E-07	1,043	23,7	76,3	-	-	-	-
109	2,25	3,896	3,74E-07	1,046	25,4	74,6	-	-	-	-
109	2,5	3,911	3,72E-07	1,048	27,2	72,8	-	-	-	-
109	2,75	3,93	3,71E-07	1,051	29,4	70,6	-	-	-	-
109	3,25	3,971	3,67E-07	1,057	34,2	65,8	-	-	-	-
109	3,75	4,02	3,63E-07	1,063	39,9	60,1	-	-	-	-
109	4,75	4,12	3,54E-07	1,066	51,5	48,5	-	-	-	-
1010	Todos	4,538	3,18E-07	1	100	-	-	-	-	-

ANEXO D. Resultados Qrod para los diferentes pozos.

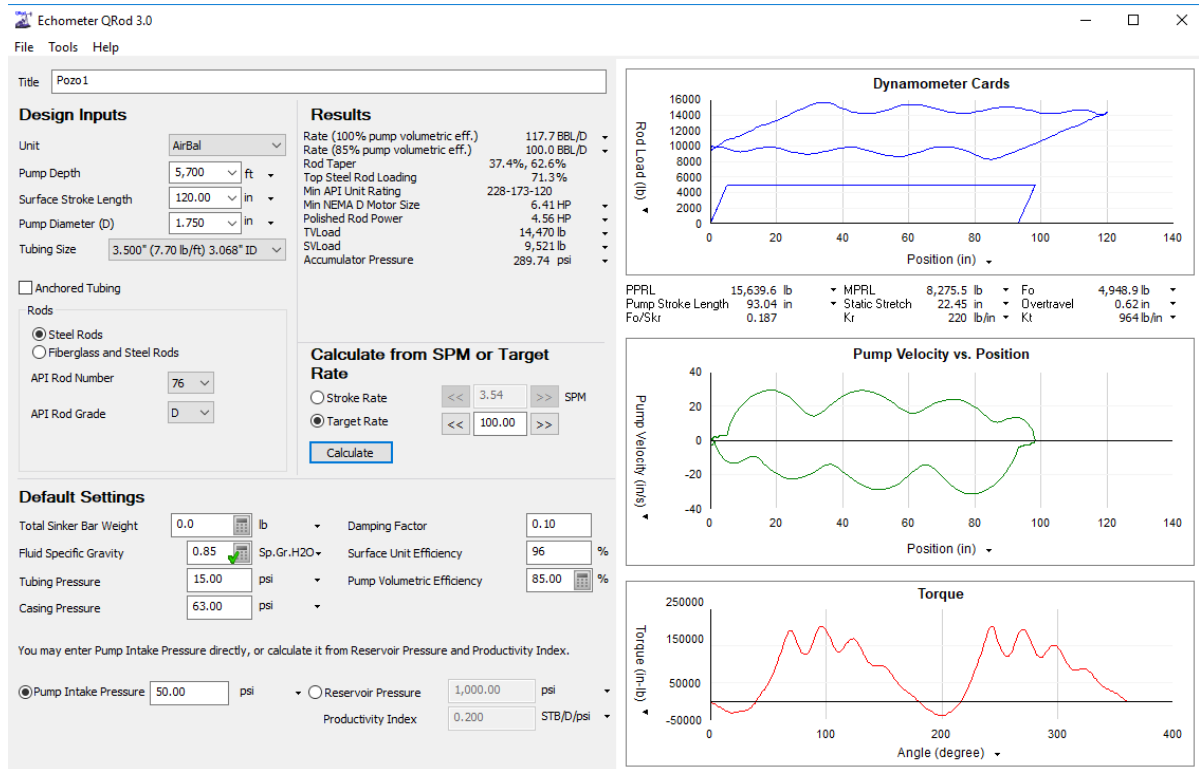
- Pozo 1:

Figura D.1. Resultados Maxistroke.



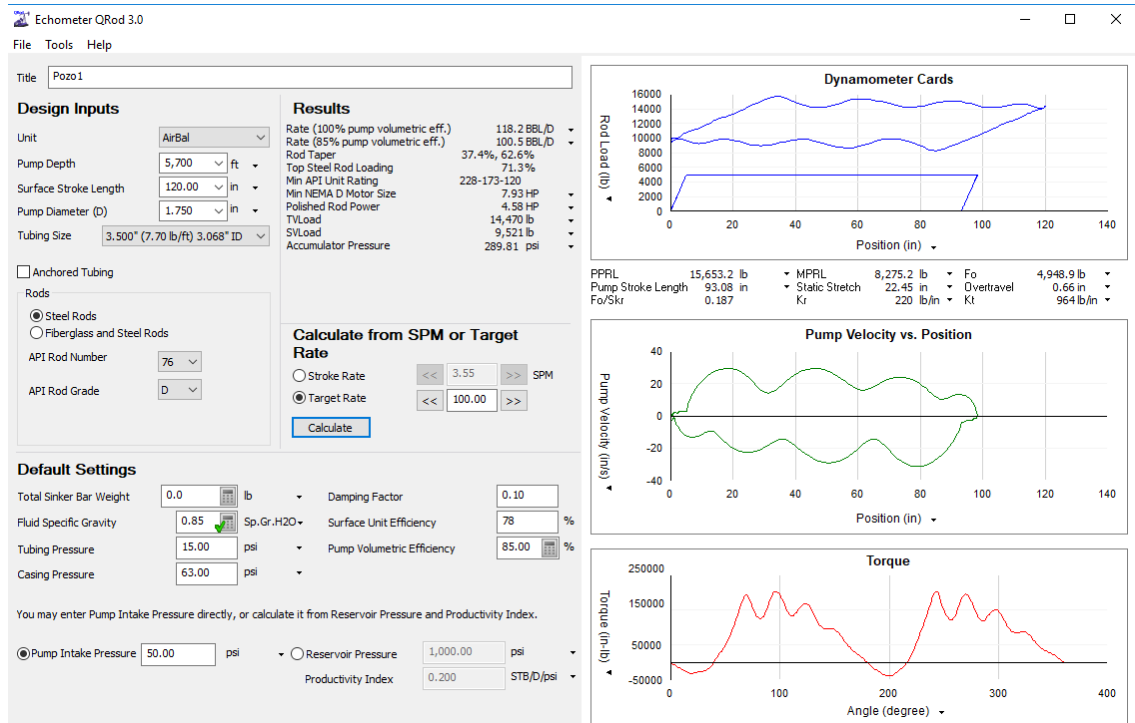
Fuente: ECHOMETER COMPANY. Ecometer Qrod Software. (Programa de computador)

Figura D.2. Resultados LRP.



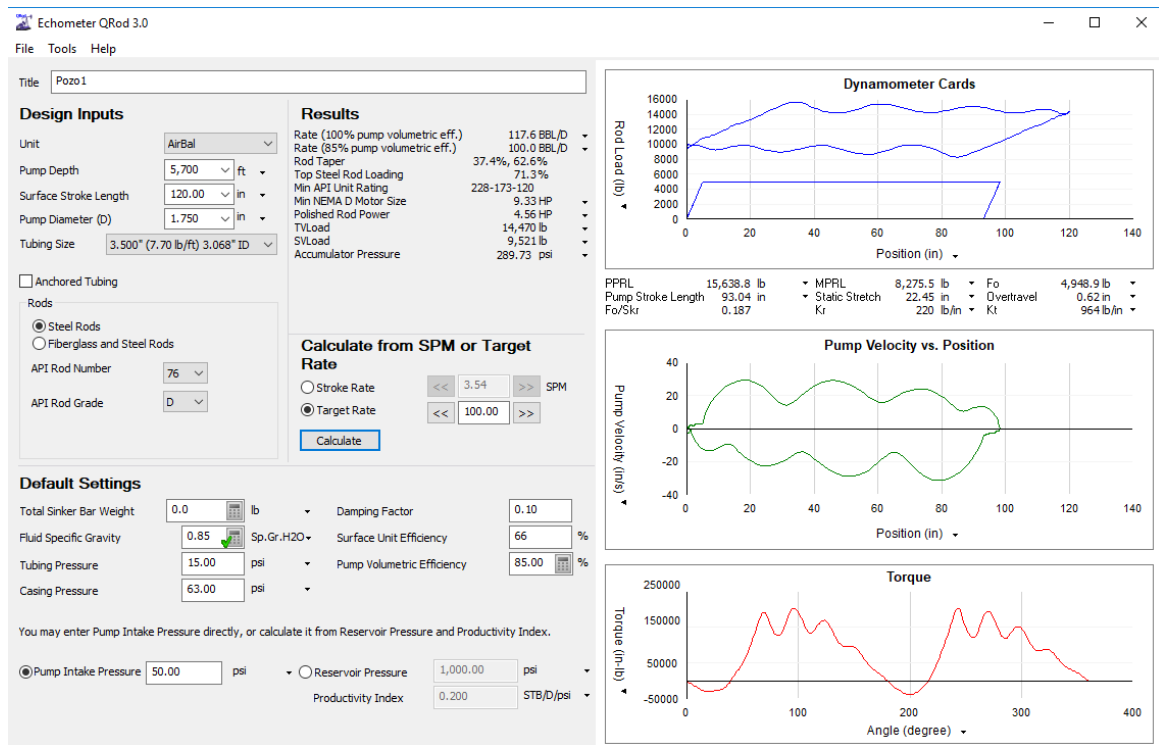
Fuente: ECHOMETER COMPANY. Echometer Qrod Software. (Programa de computador)

Figura D.3. Resultados Morlift.



Fuente: ECHOMETER COMPANY. Echometer Qrod Software. (Programa de computador)

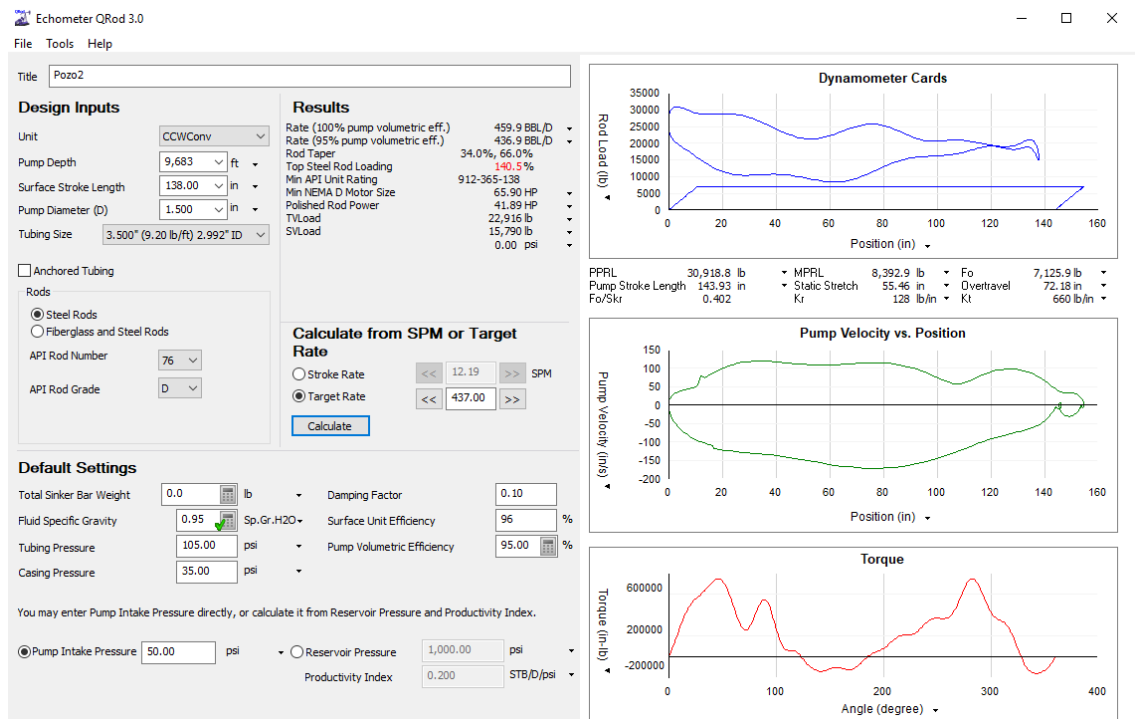
Figura D.4. Resultados Dynapump.



Fuente: ECHOMETER COMPANY. Echemeter Qrod Software. (Programa de computador)

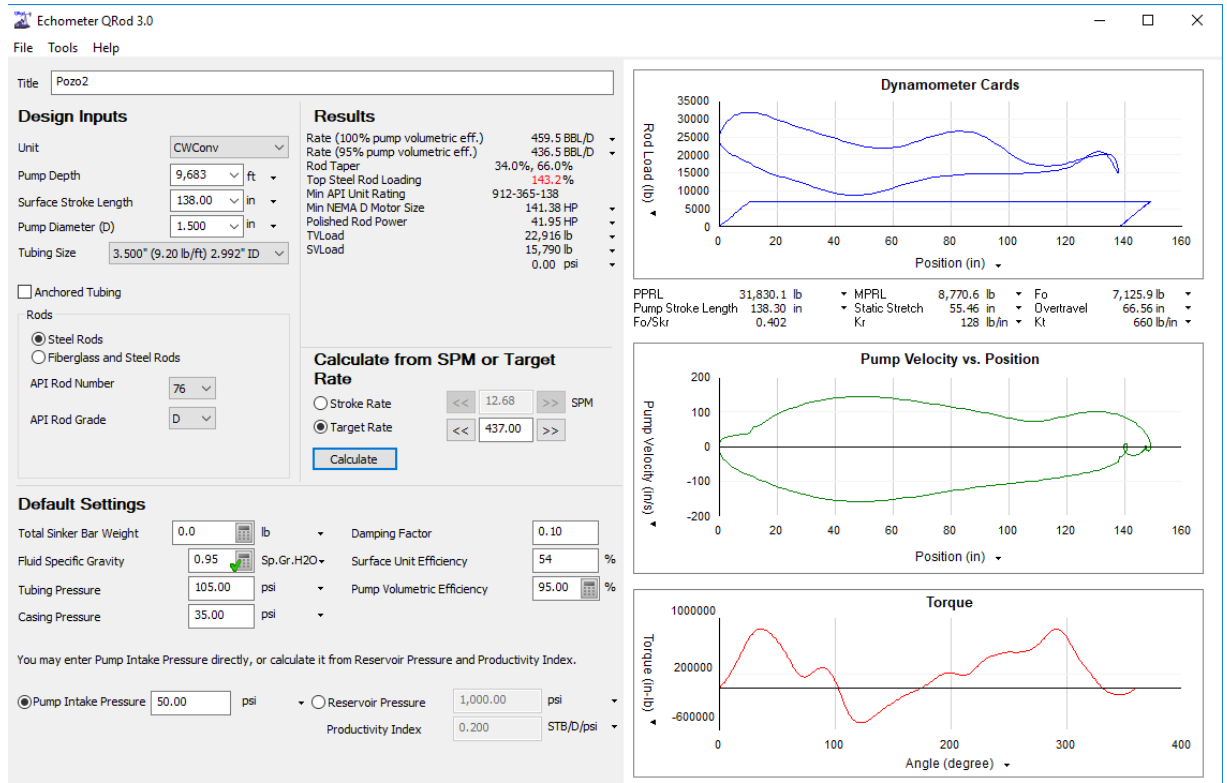
- Pozo 2:

Figura D.5. Resultados LRP:



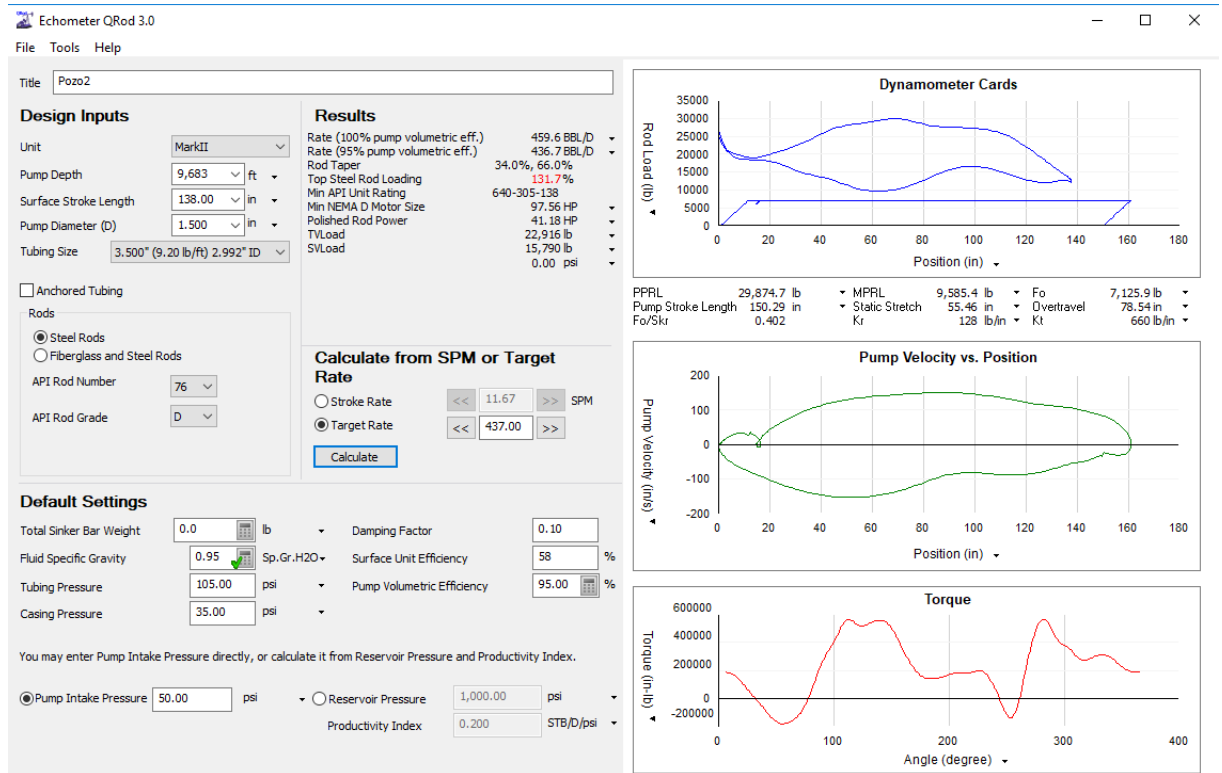
Fuente: ECHOMETER COMPANY. Echometer Qrod Software. (Programa de computador)

Figura D.6. Resultados Convencional:



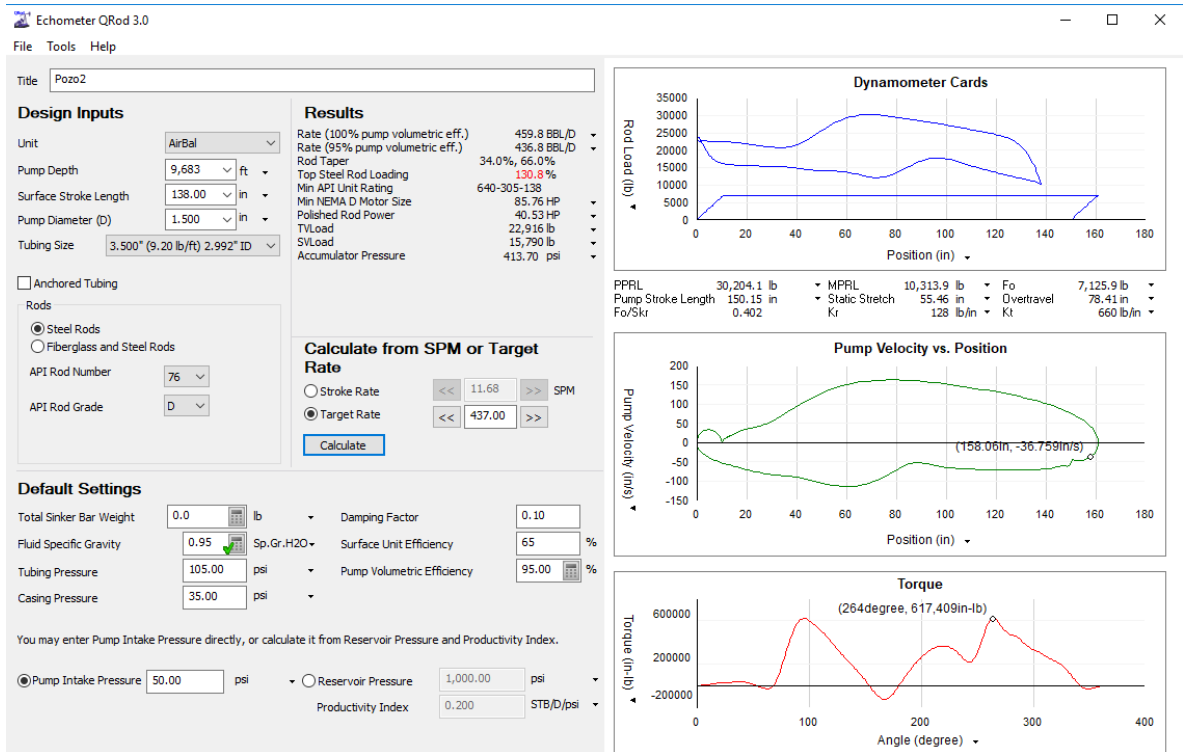
Fuente: ECHOMETER COMPANY. Echometer Qrod Software. (Programa de computador)

Figura D.7. Resultados Mark II:



Fuente: ECHOMETER COMPANY. Echometer Qrod Software. (Programa de computador)

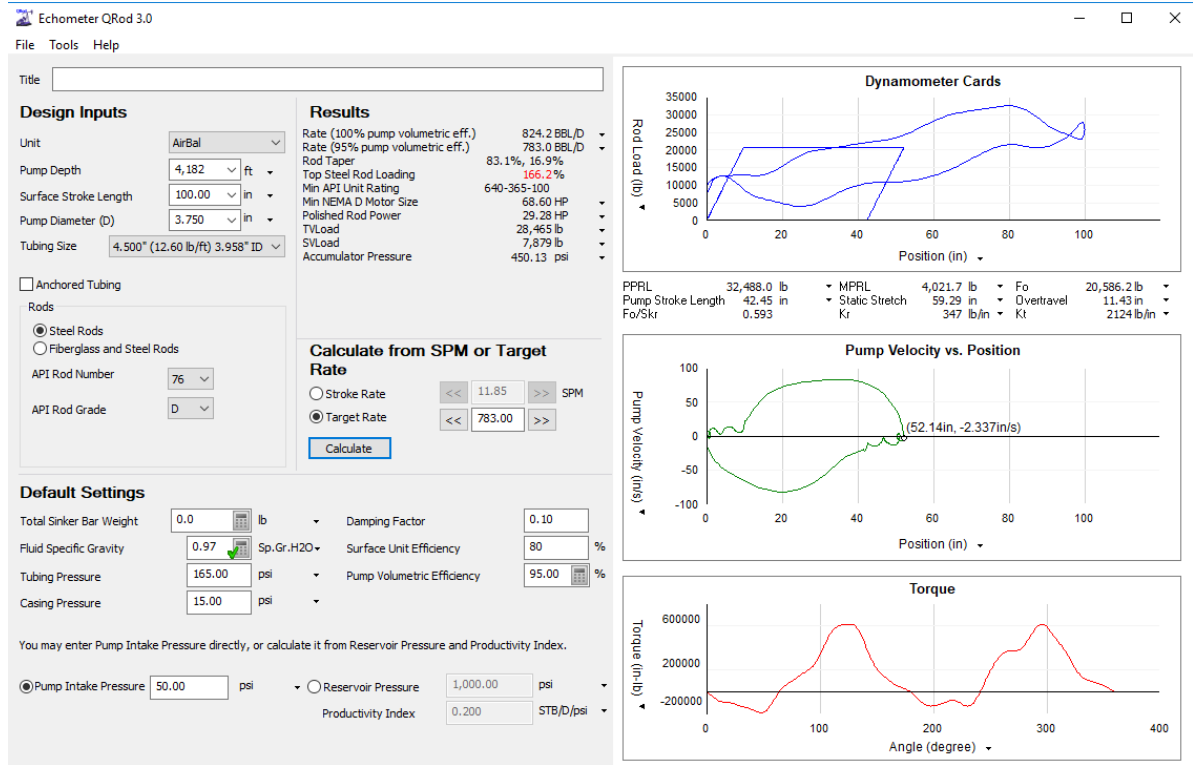
Figura D.8. Resultados Aerobalanceada:



Fuente: ECHOMETER COMPANY. Echometer Qrod Software. (Programa de computador)

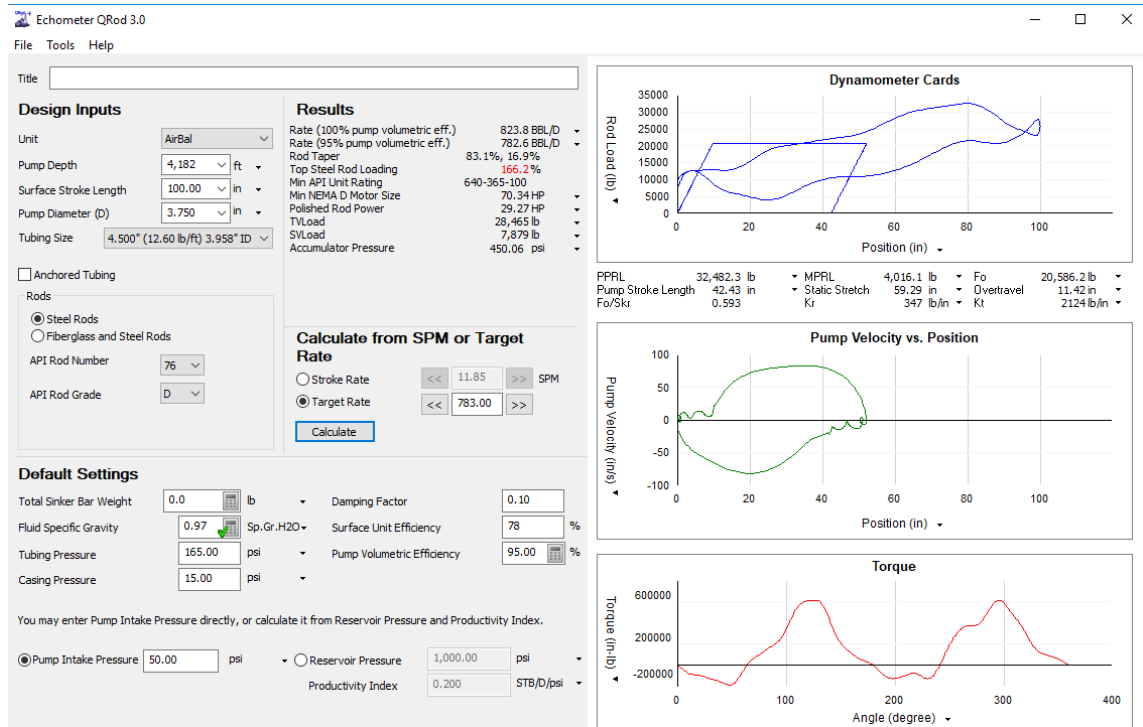
- Pozo 3:

Figura D.9. Resultados VSH2:



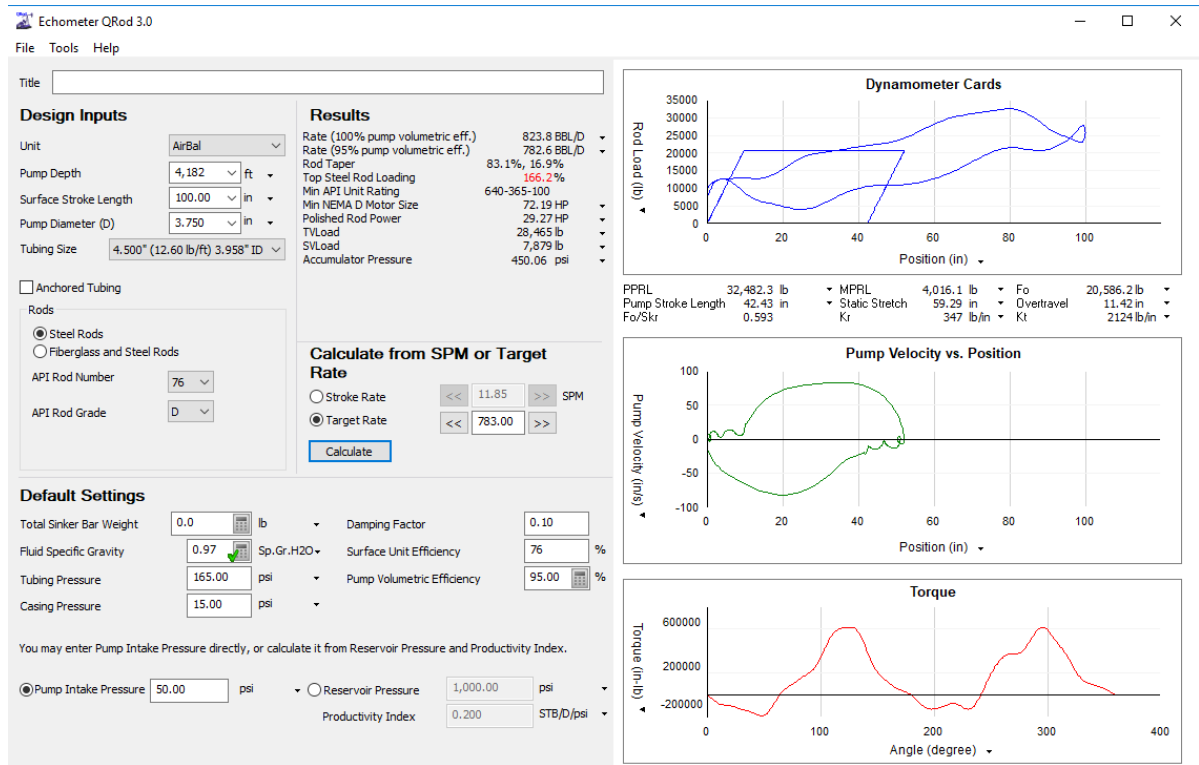
Fuente: ECHOMETER COMPANY. Echometer Qrod Software. (Programa de computador)

Figura D.10. Resultados Morlift:



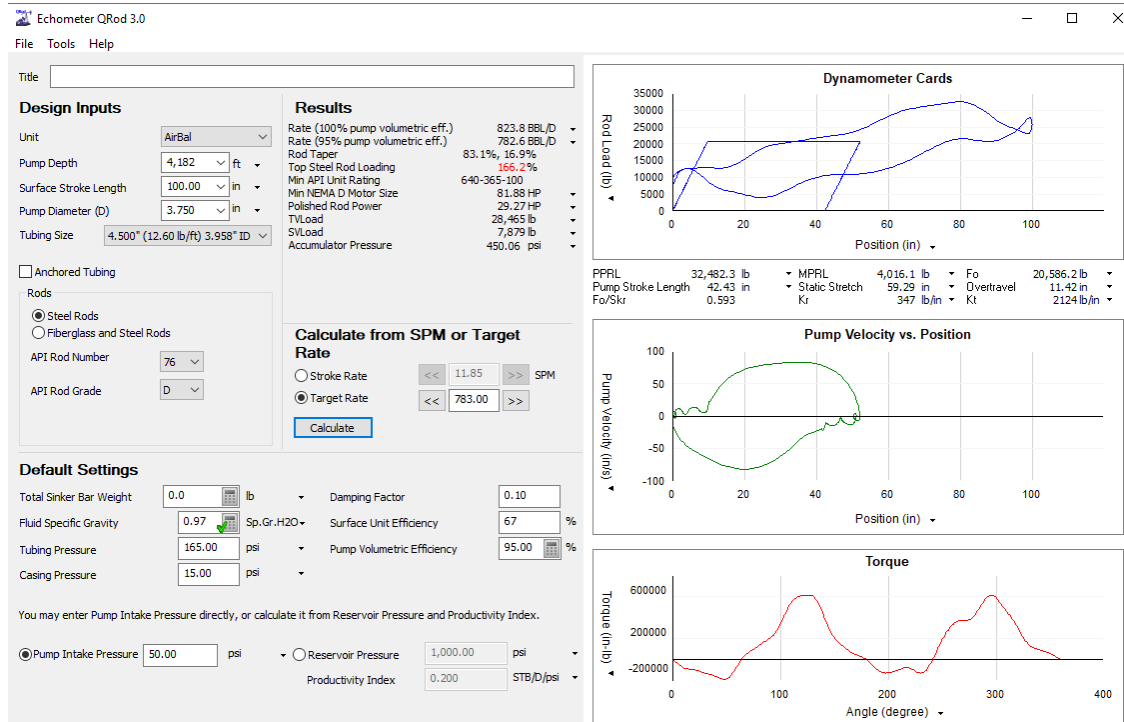
Fuente: ECHOMETER COMPANY. Echometer Qrod Software. (Programa de computador)

Figura D.11. Resultados Maxistroke:



Fuente: ECHOMETER COMPANY. Echometer Qrod Software. (Programa de computador)

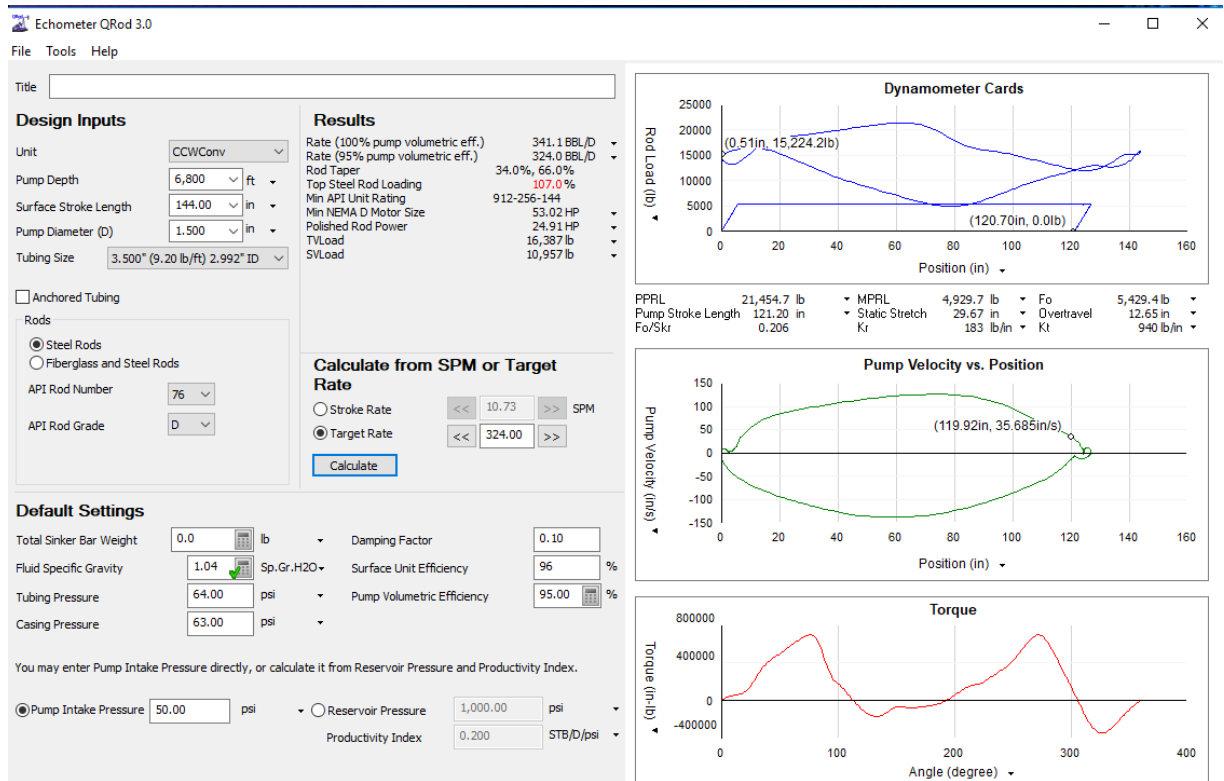
Figura D.12. Resultados Corlift:



Fuente: ECHOMETER COMPANY. EChometer Qrod Software. (Programa de computador)

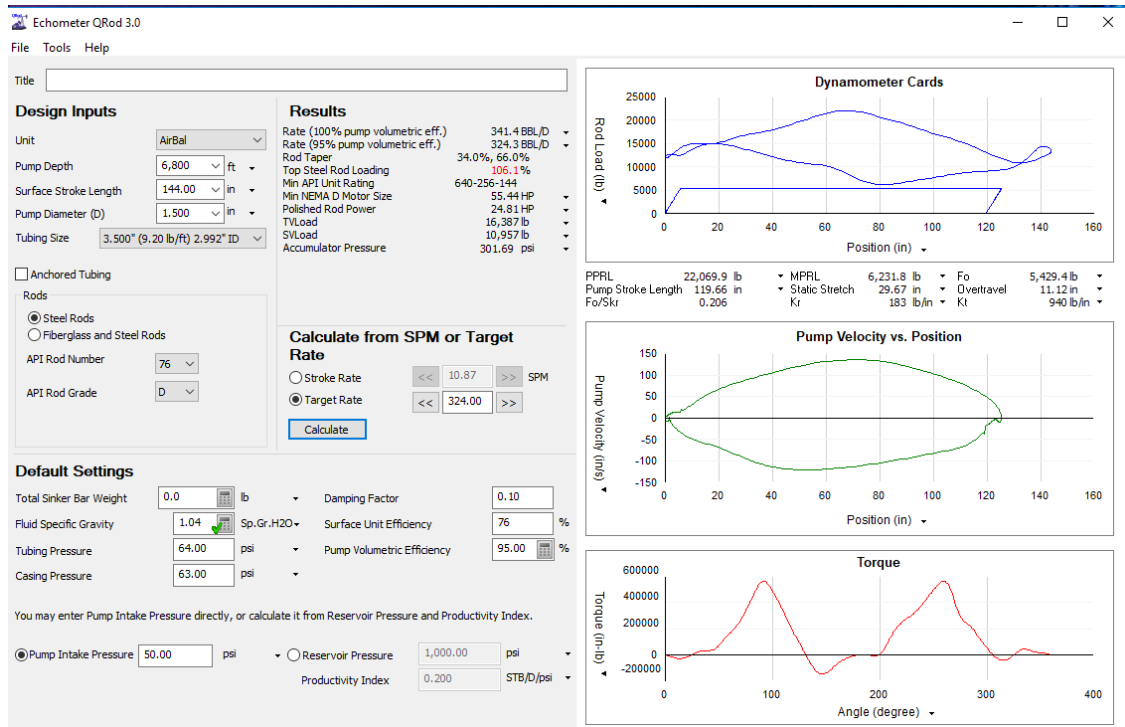
- Pozo 4:

Figura D.13. Resultados LRP:



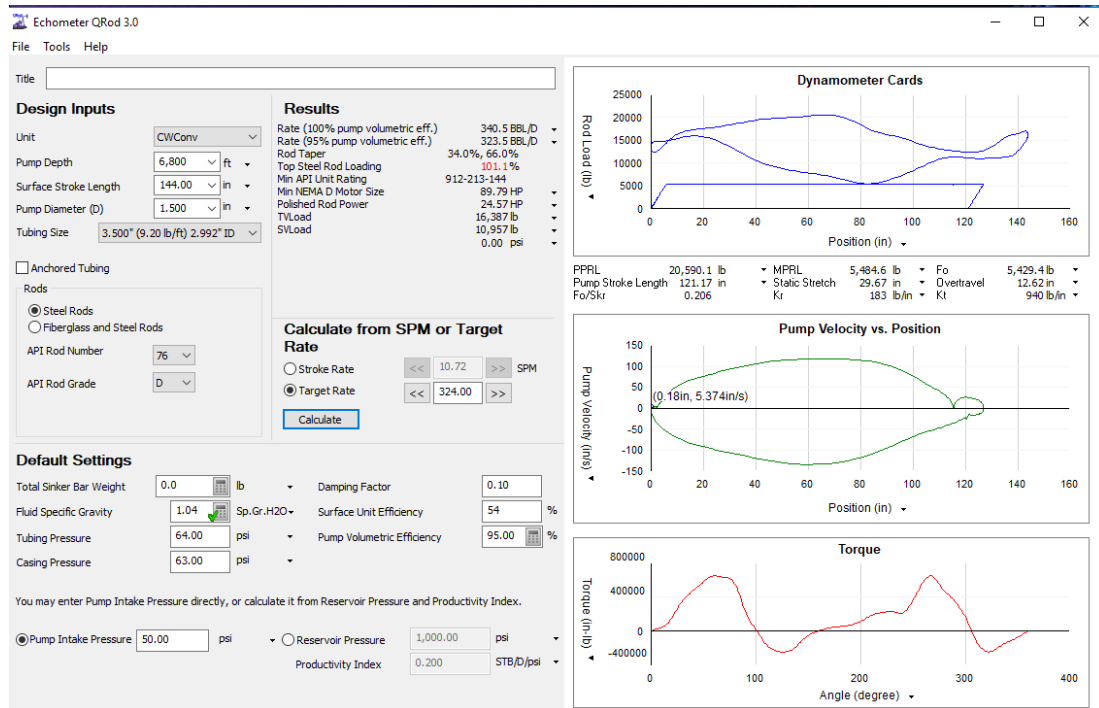
Fuente: ECHOMETER COMPANY. Echometer Qrod Software. (Programa de computador)

Figura D.14. Resultados Maxistroke:



Fuente: ECHOMETER COMPANY. Ecometer Qrod Software. (Programa de computador)

Figura D.15. Resultados Convencional:



Fuente: ECHOMETER COMPANY. Echometer Qrod Software. (Programa de computador)

ANEXO E. Ecuaciones y parámetros de diseño para una Unidad ROTAFLEX.

Para las unidades Rotaflex, se tiene:

$$Torque = \frac{84,5 \times Potencia \times EFF}{(SPM \times CR \times SV)} \quad \text{Ecuación E.1.}$$

Los factores de torque para estas unidades (TF) son normalmente calculados de la geometría de la unidad de bombeo Rotaflex como tal, y los factores de torque son calculados de acuerdo a la posición de la varilla. Los factores de torque son (+) en la subida (upstroke) y (-) en la bajada (downstroke). El factor de torque es el mismo valor en cualquier posición de la varilla durante su funcionamiento.

Estos TF para Rotaflex pueden ser calculados en varias posiciones desde cero (fondo) hasta la longitud del stroke de S con las siguientes ecuaciones:

Para $PR < R$:

$$TF = [R^2 - (R - PR)^2]^{1/2} \quad \text{Ecuación E.2.}$$

Para $PR > R$ y $PR < S-R$:

$$TF = R \quad \text{Ecuación E.3.}$$

Para $PR > S-R$:

$$TF = [R^2 - (R + PR - S)^2]^{1/2} \quad \text{Ecuación E.4.}$$

La carga neta (W_n), está dada por:

$$W_n = W - CB \quad \text{Ecuación E.5.}$$

Por tanto, el torque neto a cualquier posición de la varilla está dada por:

$$T_{wn} = TF \times W_n$$

Ecuación E.6.

Donde,

CB= Peso del contrapeso

CR= Velocidad de bombeo en la gearbox.

EFF= Eficiencia del motor

Potencia= Potencia de entrada del motor (HP)

PR= Posición de la varilla (pulgadas)

R= Radio del piñón (pulgadas)

S= Longitud de stroke (pulgadas)

SPM= Velocidad de bombeo (Stokes por minuto)

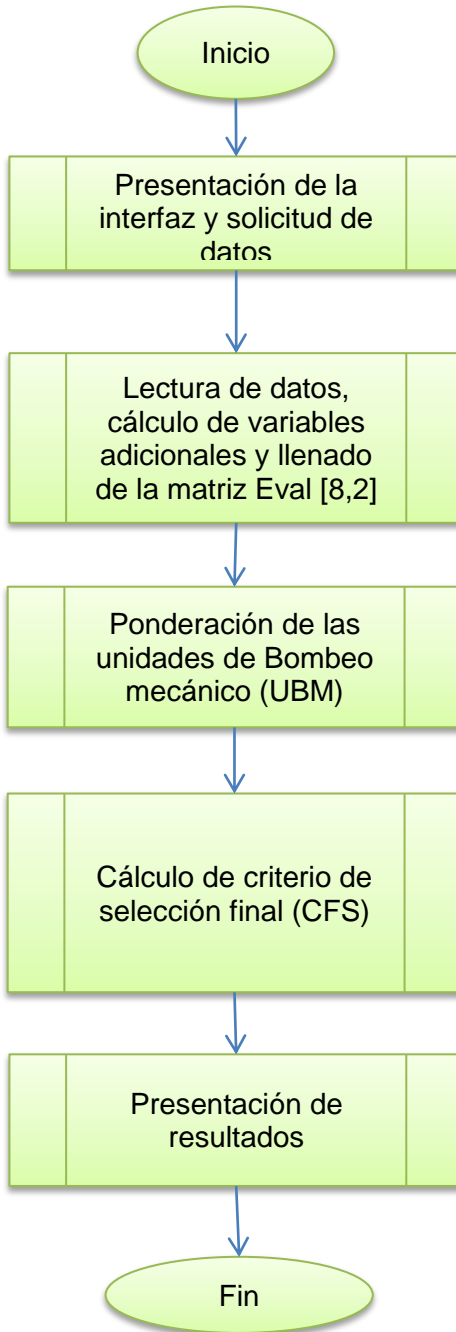
SV= Variador de velocidad, velocidad mínima/ velocidad promedio

TF= Factor de torque (pulgadas)

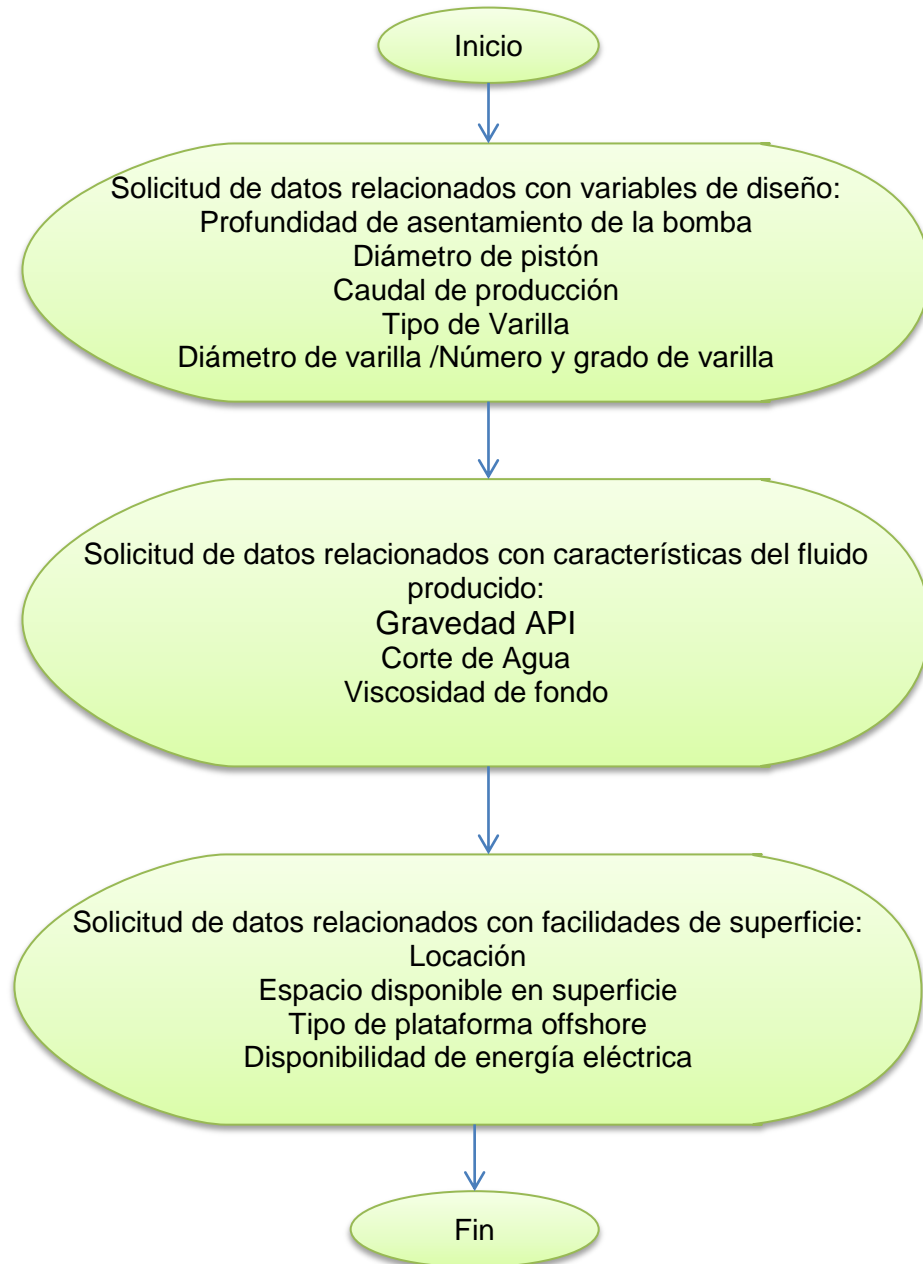
W= Carga en la varilla

Wn= Carga neta en una posición específica.

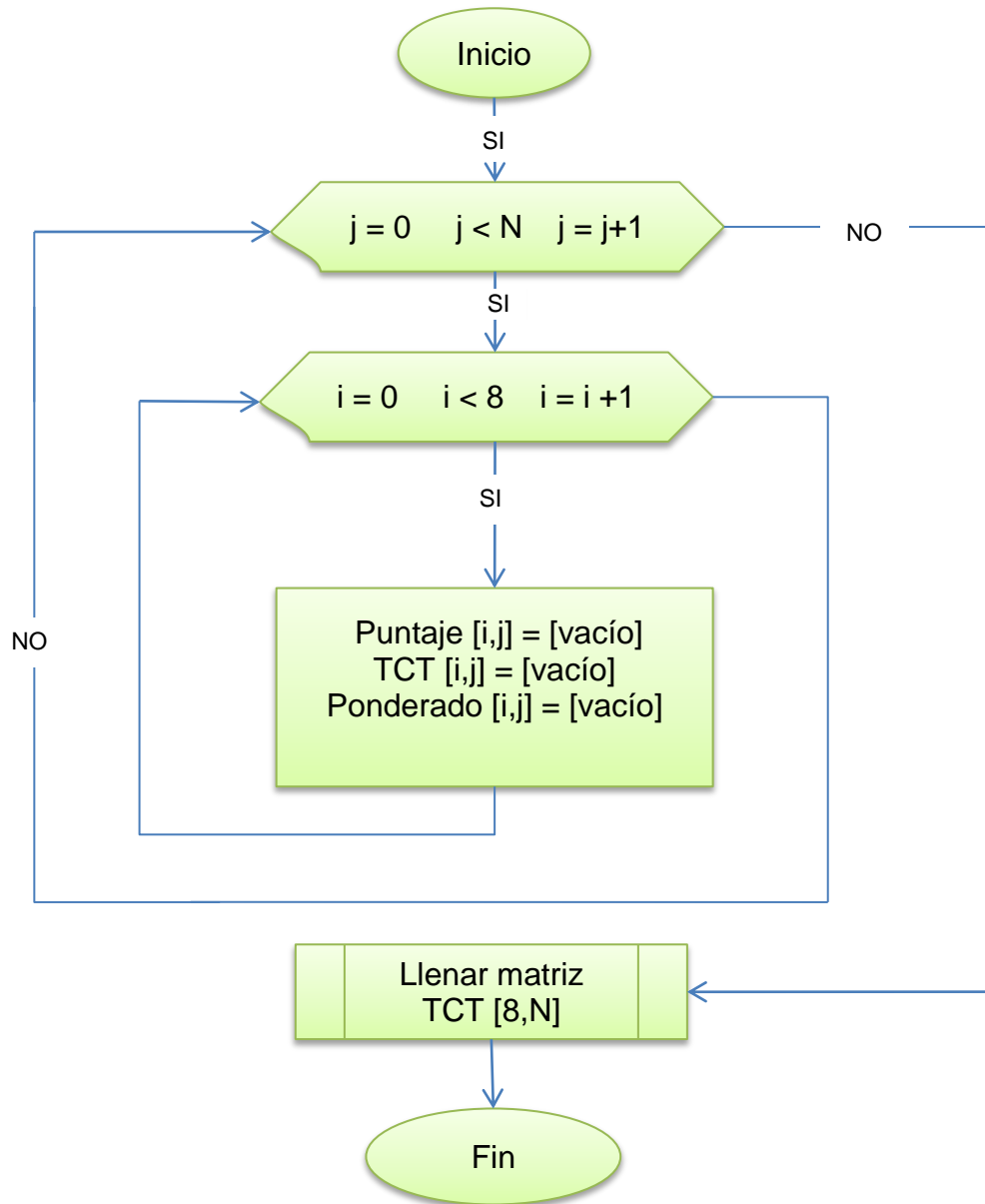
ANEXO F. Esquema General de la Metodología de Selección.



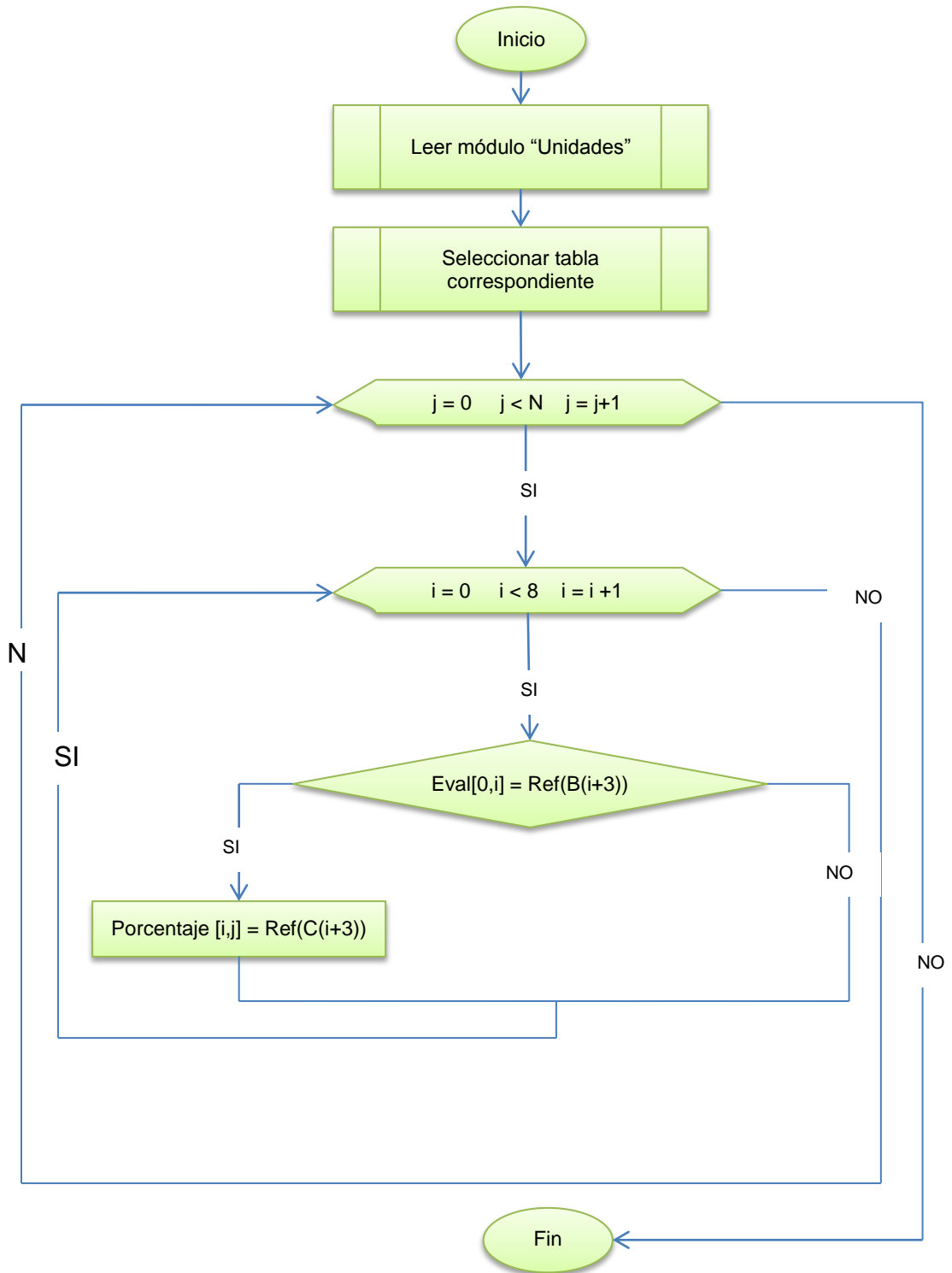
ANEXO G. Presentación de la interfaz y solicitud de datos.



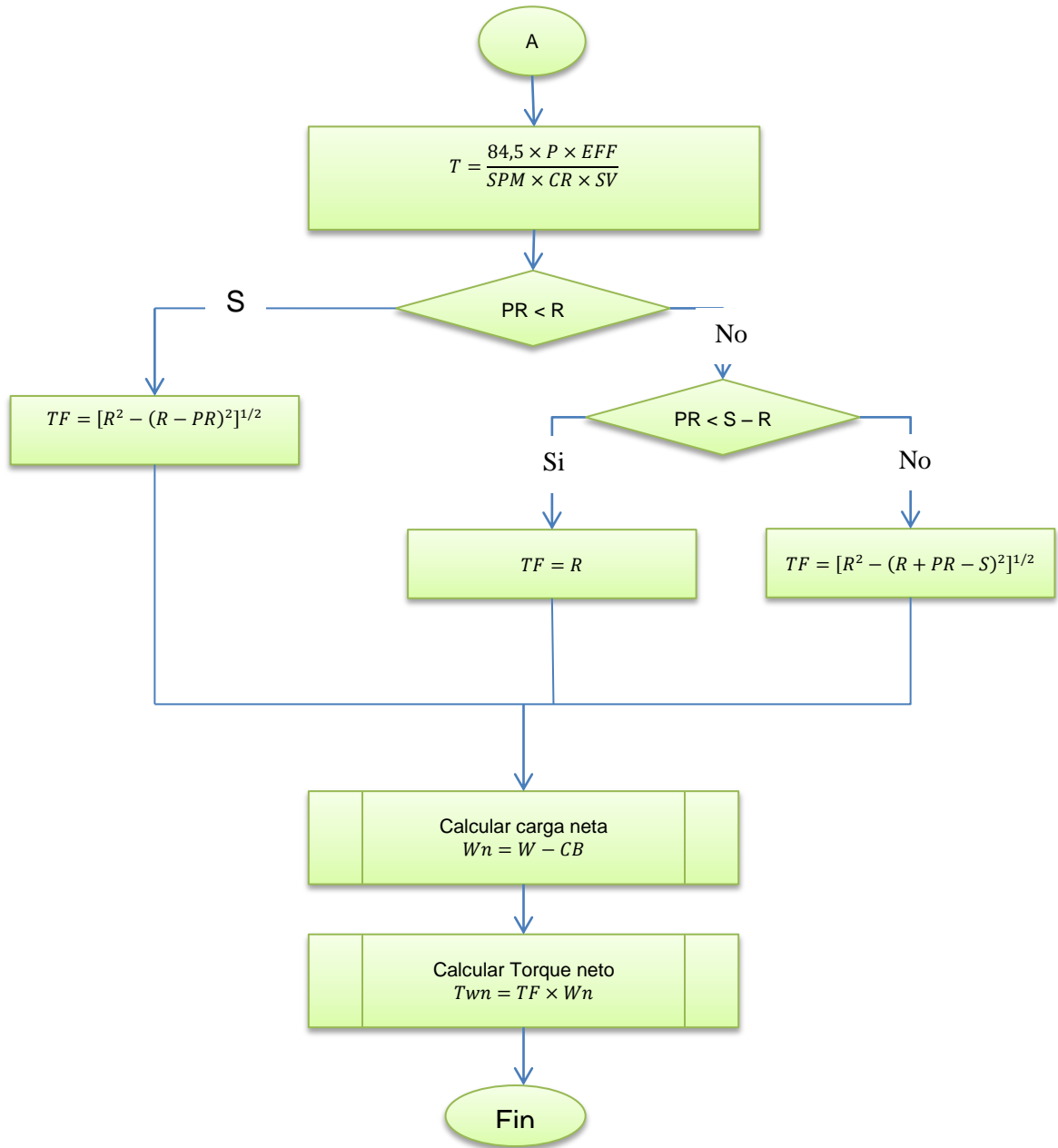
ANEXO H. Ponderación de las unidades de Bombeo Mecánico.



ANEXO I. Llenado de la matriz TCT[8,56]:



ANEXO J. Diseño del sistema de bombeo de una unidad Rotaflex.



ANEXO K. Cálculo del torque y factores de torque, carga y torque netos.

