

SEMINARIO DE INVESTIGACIÓN:
**ESTUDIO DE LAS VARIABLES INVOLUCRADAS EN LOS SISTEMAS DE
BOMBEO MECÁNICO PARA EL DISEÑO, CONTROL Y OPTIMIZACIÓN DE
POZOS EN CAMPO COLORADO.**

DIEGO ALBERTO TORRADO SOTO

FERNANDO DÍAZ GÓMEZ

JEFFERSON GIOVANNI VILLAMIZAR LÓPEZ

JORGE HUMBERTO BUITRAGO ROZO

LUIS ANDRÉS AGUILAR GÓMEZ

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA
BUCARAMANGA**

2011

**SEMINARIO DE INVESTIGACIÓN:
ESTUDIO DE LAS VARIABLES INVOLUCRADAS EN LOS SISTEMAS DE
BOMBEO MECÁNICO PARA EL DISEÑO, CONTROL Y OPTIMIZACIÓN DE
POZOS EN CAMPO COLORADO.**

DIEGO ALBERTO TORRADO SOTO

FERNANDO DÍAZ GÓMEZ

JEFFERSON GIOVANNI VILLAMIZAR LÓPEZ

JORGE HUMBERTO BUITRAGO ROZO

LUIS ANDRÉS AGUILAR GÓMEZ

**Trabajo de grado para optar al título de
Ingeniero Mecánico**

Director

MSc. JORGE ENRIQUE MENESES FLÓREZ

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA
BUCARAMANGA**

2011

AGRADECIMIENTOS

Queremos agradecer a la Universidad Industrial de Santander por facilitar nuestro crecimiento profesional, a la Escuela de Ingeniería Mecánica por brindar las herramientas necesarias para nuestra formación académica, a Campo Escuela Colorado por su contribución en la realización de este proyecto.

En especial queremos agradecer al profesor Jorge Enrique Meneses Flórez director del proyecto, por su colaboración, asesoría y apoyo durante esta etapa académica y por haber facilitado los medios para llevar a cabo las actividades desarrolladas de este proyecto de grado.

A mi madre, Luz Dary López, por su inagotable persistencia en la labor de iluminar el camino de la prosperidad para sus hijos, porque su cariño incondicional ha llenado de alegría nuestras vidas.

A mi hermano, Jhonnatan Villamizar, por su infinito y contagioso carisma, porque haber crecido sobre sus hombros me ha permitido llegar más alto.

A mi novia, Zaira Bejarano, por su amor incesante, porque cada instante diferencial que sucedió al siguiente durante estos seis años, fueron uno sobre otro, los mejores que he pasado en mi existencia.

JEFFERSON GIOVANNI VILLAMIZAR LÓPEZ

La culminación de este logro no solo se debe a mi dedicación e interés en el conocimiento, sino también a la ayuda de muchas personas que hicieron que todo esto sea posible.

Es por eso que me place expresar mis agradecimientos nombrando a algunas personas; aunque en realidad agradezco a todo y a todos con los que he interactuado, pues todos tenemos algo que enseñar.

A mi familia, por estar ahí desde el día uno, en especial a mis padres Humberto Buitrago y Belén Rozo, quienes con inmenso cariño y esfuerzo han luchado constantemente por sacarme adelante; a mi hermano del alma Fabían Buitrago, porque sin él no sería yo, ni estaría acá, por enseñarme que la base es el trabajo y la constancia. Junto con él a Mónica Monroy y a mis hermanas Sandra, Adriana y Carol por su confianza. A muchos de mis familiares, en especial a Victoria Rozo y Cruz Rozo. A Carlos Prada y María Ceferino. A Criss Mejía por darme tanta felicidad y motivarme en el presente; a Rock City Tattoo Bar por brindarme la oportunidad de trabajar con ellos; a mis compañeros de proyecto de grado y compañeros de la carrera, y en fin, a muchas otras personas más, a quienes sí nombrara, no acabaría de agradecer.

A Jorge Enrique Meneses como director del proyecto, tanto por su colaboración en mi formación como persona y como Ingeniero, como por habernos facilitado los medios suficientes para llevar a cabo las actividades desarrolladas en este proyecto de grado.

Gracias a todos los que forman parte del presente por sus ánimos y apoyo, aún nos quedan muchos años, muchos logros, muchas metas por cumplir y mucha vida.

JORGE H. BUITRAGO ROZO

Dedico este logro a mi madre Mireya, por su paciencia y por dedicar los mejores años de su vida en conseguir un futuro mejor para su familia.

A mi hermano Felipe, por su apoyo incondicional, por su cariño y comprensión.

A una amiga muy especial, cuyo apoyo en estos últimos meses fue crucial para llegar a este punto de mi vida.

DIEGO ALBERTO TORRADO SOTO

A mis papas, Henry Aguilar y Aminta Gómez, por su constante e incondicional apoyo en todas las etapas de mi vida y quienes hicieron posible alcanzar este objetivo. Origen de toda mi motivación y fuente de inspiración.

A mis hermanos, Jhon Aguilar y Marcela Aguilar, por su entera confianza y amistad.

A los dos nuevos integrantes de la Familia, Luis Felipe Aguilar y Mattía Aguilar, dos excusas más para seguir adelante en esta etapa de mi vida.

A mi novia, Silvia Juliana Carrillo, por su entero amor, sinceridad y apoyo incondicional siempre cuando más lo necesitaba. Origen de Fortaleza y alegría.

A toda mi Familia, Gracias por creer en mí.

A todos los parceros, pero en especial a Renzo Quevedo, Jhonatan Villamizar, William, Julián, Jorge Buitrago, Jefferson Villamizar, Diego Torrado, en fin, por estar siempre donde tienen que estar y ayudarme en diferentes momentos de mi vida.

LUIS ANDRÉS AGUILAR GÓMEZ

CONTENIDO

	pág.
INTRODUCCIÓN	32
I. SEMINARIO DE INVESTIGACIÓN	34
1. GENERALIDADES DEL SEMINARIO DE INVESTIGACIÓN	34
1.1 QUÉ ES EL SEMINARIO DE INVESTIGACIÓN	34
1.2 OBJETIVO DEL SEMINARIO DE INVESTIGACIÓN	35
1.3 VENTAJAS DEL SEMINARIO DE INVESTIGACIÓN	36
1.4 CARACTERÍSTICAS	37
1.5 ORGANIZACIÓN DEL SEMINARIO DE INVESTIGACIÓN	38
1.5.1 Tema del seminario de investigación	39
1.5.2 Dirección del seminario de investigación: estudio de las variables involucradas en los sistemas de bombeo mecánico para el diseño, control y optimización de pozos en Campo Colorado.	39
1.5.3 Desempeño de los roles	40
1.6 METODOLOGÍA	41
2. PLANEACIÓN	42
2.1 ESTUDIO BIBLIOGRÁFICO	43
2.2 DESCRIPCIÓN DE LOS SUBTEMAS	51
2.3 PLANEACIÓN DE LAS SESIONES	53
3. EJECUCIÓN	55
3.1 DOCUMENTACIÓN PARA LOS SUBTEMAS	55
3.2 DESARROLLO DE UNA SESIÓN	55
3.3 ACTA	56
4. FINALIZACIÓN	57
4.1 ENTREGABLE 1: PRESENTACIÓN DE LAS SESIONES	59
4.2 ENTREGABLE 2: LIBRO SÍNTESIS ORIGINAL	62
4.3 ENTREGABLE 3: BASE DE DATOS	66
4.4 ENTREGABLE 4: DESARROLLO DE SOFTWARE	70
4.4.1 Programa en Matlab de la ecuación de onda.	70
4.4.2 Programa en Matlab del Método API RP11L	83
4.5 ENTREGABLE 5: TRADUCCIÓN TESIS DEL PORTUGUÉS AL ESPAÑOL	97

5.	CONCLUSIONES	99
6.	RECOMENDACIONES	103
7.	BIBLIOGRAFÍA	106

LISTA DE TABLAS

pág.

Tabla 1. Especificación de los temas y subtemas.....	51
Tabla 2. Organización de las sesiones	53
Tabla 3. Rol asignado a los participantes del proyecto en las diferentes sesiones	54
Tabla 4. Desarrollo de una sesión del Seminario de Investigación.....	55
Tabla 5. Nomenclatura para el K-ésimo tramo de varilla simple.....	73
Tabla 6. Datos del pozo estudiado.....	78
Tabla 7. Datos asociados a los tramos de la sarta de varillas.	79

LISTA DE FIGURAS

pág.

Figura 1. Productos obtenidos en el desarrollo del seminario de investigación.....	57
Figura 2. Formato de las presentaciones.....	60
Figura 3. CD “Audio visuales de las sesiones del seminario”.....	62
Figura 4. Carátula del libro síntesis original.....	64
Figura 5. Página de inicio de cada capítulo (capítulo 1 en esta imagen).....	65
Figura 6. Páginas interiores del libro síntesis original.....	66
Figura 7. Ventajas de “Papers for mac”.....	67
Figura 8. Organización de la documentación del seminario.....	68
Figura 9. Lista de la documentación disponible del capítulo 6 “Diseño del sistema”.....	69
Figura 10. CD que contiene el programa de la ecuación de onda.....	70
Figura 11. Filtración de la información de la barra pulida para obtener la carta de fondo.....	71
Figura 12. Sarta de varillas combinada. Coordenadas de posición axial y desplazamiento.....	74
Figura 13. Diagrama de flujo para la simulación del método matemático propuesto.....	76
Figura 14. Interfaz gráfica de la aplicación del método de la ecuación de onda....	78
Figura 15. Bloc de notas con los valores medidos de posición y carga.....	80
Figura 16. Cuadro de diálogo que solicita la búsqueda del bloc de notas.....	81
Figura 17. Dinagrama de superficie y de fondo calculado a partir del método de ecuación de onda.....	81
Figura 18. Diagrama de posición vs tiempo a la profundidad de asentamiento de la bomba.....	82
Figura 19. Presentación del CD del Programa del Método API RP11L.....	83
Figura 20. Similitud de Cartas Dinagráficas en función de los parámetros adimensionales (API RP11L).....	85
Figura 21. Carta dinagráfica básica.....	87
Figura 22. Interfaz del programa del método API RP 11L.....	93
Figura 23. Selección de parámetros estándar.....	94
Figura 24. Resultados arrojados por el programa del método API RP 11L.....	94
Figura 25. Créditos del programa del método API RP 11L.....	95

Figura 26. CD que contiene la traducción del portugués al español de la tesis de Manuel de Almeida Barreto Filho.....97

GLOSARIO

Aceite crudo. El aceite que proviene de un yacimiento, después de separarle cualquier gas asociado y procesado en una refinería; a menudo se le conoce como crudo.

Anclas de gas. Las anclas de gas son diseñadas para separar el gas libre del líquido producido antes que este entre en la bomba. Estas operan con el principio de separación por densidad.

Árbol de Navidad. El arreglo de tuberías y válvulas en la cabeza del pozo que controlan el flujo de aceite y gas y prevean reventones.

API. Sigla de American Petroleum Institute, que es una asociación estadounidense de la industria petrolera, que patrocina una división de la producción petrolera en la ciudad de Dallas, Texas. El instituto fue fundado en 1920 y se constituyó en la organización de mayor autoridad normativa de los equipos de perforación y de producción petrolera. Publica códigos que se aplican en distintas áreas petroleras y elabora indicadores, como el peso específico de los crudos que se denomina "grados API".

Barril. Una medida estándar para el aceite y para los productos del aceite. Un barril = 35 galones imperiales, 42 galones US, ó 159 litros.

Barriles por día. En términos de producción, el número de barriles de aceite que produce un pozo en un período de 24 horas, normalmente se toma una cifra promedio de un período de tiempo largo. (En términos de refinación, el número de barriles recibidos o la producción de una refinería durante un año, divididos por trescientos sesenta y cinco días menos el tiempo muerto utilizado para mantenimiento).

Bomba de fondo. Es la encargada de permitir la entrada de fluido de la formación a la tubería de producción y le proporciona la energía necesaria para levantarlo hasta superficie. Las bombas de subsuelo usadas en el bombeo mecánico trabajan sobre el principio del desplazamiento positivo y son del tipo cilindro-pistón. Sus partes básicas son el barril de trabajo, el pistón y las dos válvulas de bola.

Bombeo neumático. Uno de varios métodos de elevación artificial. Un proceso mecánico que utiliza la inyección continua o intermitente de un gas dentro de la tubería de producción para aligerar o desplazar los fluidos producidos. Esto crea una reducción de presión en el fondo del pozo, incrementando o sustentando el flujo del pozo.

Cabeza de pozo. Equipo de control instalado en la parte superior del pozo. Consiste de salidas, válvulas, preventores, etc.

Carga pico. La carga máxima producida o consumida por una unidad durante un determinado período.

Casquete de gas. En un campo que contiene gas y aceite, parte del gas se almacenará a menudo en la parte superior del yacimiento en un depósito único conocido como casquete de gas.

Desbalance estructural. Es la fuerza que se necesita para que la barra pulida mantenga la viga viajera en una posición horizontal con los brazos pitman desconectados de los pins de la manivela.

Desplazamiento de la bomba. Es la rata teórica a la cual se bombea fluido y corresponde al volumen de aceite desplazado por el pistón en un ciclo en el caso de que el fluido llenara completamente la bomba en la carrera ascendente y fuese incompresible. Se trata de un caudal geométrico.

Dinagrama de fondo. Para entender la forma de un Dinagrama de fondo es necesario comprender las condiciones físicas en las que está operando el barril, el pistón y las válvulas en el ciclo de bombeo.

Dinagrama de superficie. El Dinagrama de superficie es un registro de cargas, sobre la barra pulida para determinar en superficie el comportamiento de la bomba durante cada ciclo de bombeo.

Dinamómetro. Se define como un instrumento para medir fuerza. La palabra dinamómetro es una derivación de las palabras griegas "Dynamis" que significa "fuerza" y "metro" que significa "dispositivo de medición". El dinamómetro registra las cargas del pozo impuestas sobre la barra pulida (fuerzas) como una función de la posición de la barra pulida. Este registro de carga vs posición es llamado "carta dinográfica".

Efecto Contrabalance. El efecto contrabalance es la carga grabada en la barra pulida con la unidad de bombeo detenida, el freno sacado, y las manivelas tan cerca de la horizontal como sea posible. Cuando se graba el efecto de contrabalance, el torque causado por las cargas en la barra pulida es igual y opuesto al torque de las contrapesas.

Equipo de superficie. Su función es transmitir energía del motor principal a la sarta de varillas de succión. Para hacer esto, el equipo debe cambiar el movimiento rotatorio del motor principal, a un movimiento recíprocante con las varillas de succión y debe reducir la velocidad del motor principal a una velocidad adecuada de bombeo.

Espacio anular. Es el espacio que queda entre el aparejo de producción y la tubería de revestimiento o casing, dentro de un pozo.

Factor de cargas cíclicas. El factor de cargas cíclicas es un número que muestra que tan uniforme es el torque en la caja de engranaje.

Factor de torque. Es un número que cuando se multiplica por las cargas en la barra pulida da el torque causado por las cargas en la barra pulida.

Gravedad API. La escala utilizada por el Instituto Americano del Petróleo para expresar la gravedad específica de los aceites.

Gravedad específica. La relación de la densidad de una sustancia a determinada temperatura con la densidad de agua a 4°C.

Golpe de fluido. Si el nivel del pozo ha disminuido considerablemente, la bomba quedara parcialmente llena de líquido y de gas a baja presión. Cuando el pistón realiza su carrera descendente, la presión dentro del barril de la bomba no es suficientemente grande para abrir la válvula viajera, esta solo abrirá cuando choca bruscamente con el líquido. El impacto del pistón con el líquido es causa de múltiples problemas en el sistema

Hidrocarburo. Cualquier compuesto o mezcla de compuestos, sólido, líquido o gas que contiene carbono e hidrógeno (p. ej.: carbón, aceite crudo y gas natural).

Índice de productividad (IPR). Es la razón de la tasa de producción por caída de presión.

Interferencia de gas: El gas que afecta el rendimiento de la bomba puede ser gas libre en el petróleo en la entrada de la bomba o gas disuelto que se libera por la caída de presión dentro de la bomba. Este gas ocupa un espacio en el barril de la bomba reduciendo el espacio disponible para el petróleo y también causa un retardo en el cierre y apertura de las válvulas, disminuyendo el llenado de la bomba con líquido.

Mmpcd. Unidad de flujo volumétrico normalmente utilizada en la industria petrolera para el gas y que indica millones de pies cúbicos por día de gas a condiciones estándar de 1 atm y 60°F.

Nivel de Fluido: Profundidad a la que se encuentra el líquido en el anular medido desde la superficie

Permeabilidad: Capacidad de las rocas de permitir el flujo de líquidos o gases a través de sus espacios vacíos.

Petróleo: Mezcla en proporciones variables de hidrocarburos sólidos, líquidos o gaseosos que se encuentran en los yacimientos bajo presiones y temperaturas más o menos elevadas. Los petróleos crudos pueden ser de base parafínica, asfáltica o mixta. Los crudos de petróleo, según la densidad, se clasifican en:

- a) Pesados (10° a 23,3° API).
- b) Medios (22,3° a 31,1° API).
- c) Livianos (superiores a los 31,3° API).

El grado API se fija mediante una escala adoptada por el American Petroleum Institute para medir la densidad de los petróleos brutos. La escala varía generalmente entre 10° (equivalente a una densidad de 1,0000) y 100° (equivalente a una densidad de 0,6112) con relación al agua a 4° C de temperatura.

Potencia Hidráulica. Es la Potencia encargada de entregarle la energía al fluido para que este pueda ser llevado desde la bomba de fondo hasta la superficie

Pozo. Agujero perforado en la roca desde la superficie de un yacimiento a efecto de explorar o para extraer aceite o gas.

Pozo desviado. Un pozo perforado en ángulo con la vertical (perforación desviada), para cubrir el área máxima de un yacimiento de aceite o de gas, o para librar el equipo abandonado en el agujero original.

Presión. El esfuerzo ejercido por un cuerpo sobre otro cuerpo, ya sea por peso (gravedad) o mediante el uso de fuerza. Se le mide como fuerza entre área, tal como newtons/por metro².

Presión absoluta. Esta es la presión manométrica más la presión atmosférica.

Presión Atmosférica. El peso de la atmósfera sobre la superficie de la tierra. A nivel del mar, ésta es aproximadamente 1.013 bars, 101,300 Newtons/m², 14.7 lbs/pulg² ó 30 pulgadas de mercurio.

Presión crítica. La presión mínima requerida para licuar un gas a su temperatura crítica.

Presión de Burbujeo. Es la presión de un sistema en el punto de burbujeo.

Presión de fondo estática (SBHP). Es la presión de un yacimiento a condiciones estáticas, es decir, cuando no existe movimiento de fluidos dentro del mismo y todas las fases se encuentran en equilibrio. Esta presión se mide en el fondo de un pozo a nivel de la zona de disparos, cuando éste se ha permanecido cerrado durante el tiempo suficiente hasta estabilizarse.

Presión de fondo fluyente (PBHP). Es la presión que se mide en el fondo de un pozo a nivel de la zona de disparos, a condiciones de flujo gobernadas por un estrangulador.

Presión hidrostática: Presión ejercida por una columna de fluido. Es igual a la altura de la cola, multiplicada por la densidad del líquido, multiplicada por la aceleración gravedad.

Presión manométrica. La presión que registra un dispositivo de medición normal. Dicho dispositivo mide la presión en exceso de la atmosférica.

Porosidad: Volumen de las rocas ocupado por espacios vacíos entre los granos minerales, Es en estos espacios donde se acumula petróleo, gas y/o agua.

Punto de Burbujeo: Es el estado en equilibrio de un sistema compuesto de petróleo crudo y gas, en la cual el petróleo ocupa prácticamente todo el sistema, excepto en una cantidad infinitesimal de gas. Para propósitos prácticos puede considerarse 100% líquido es la misma que la composición del sistema.

Recuperación primaria. Afluencia natural del petróleo o del gas desde el seno del yacimiento a la superficie por la diferencia de las presiones. La circulación del fluido puede ser natural o por bombeo.

Recuperación secundaria. Operación que consiste en inyectar agua en el yacimiento con la finalidad de desplazar mayores volúmenes de petróleo a la superficie. Esta operación también incluye la combustión "in situ" de los petróleos pesados. El método permite recuperar hasta un 25% más de petróleo.

Recuperación terciaria. Los tipos de procedimientos de recuperación terciaria consisten en inyectar en los yacimientos disolventes miscibles, gases hidrocarbonados o gas carbónico como también agua con sosa, tensoactivos o polímeros hidrosolubles.

Registro acústico. Un registro del tiempo que toma una onda acústica (sonido) para viajar cierta distancia a través de formaciones geológicas. También es llamado registro sísmico.

Reventón. El escape sin control de aceite, gas o agua de un pozo debido a la liberación de presión en un yacimiento o a la falla de los sistemas de contención.

Sarta de varillas. La sarta de varillas conecta la bomba de fondo con la barra pulida. La función principal es transmitir el movimiento oscilatorio de la barra pulida a la bomba.

SPM. Carreras por minuto que realiza la Unidad de Bombeo.

Temperatura crítica. La temperatura arriba de la cual un gas no puede ser licuado cualquiera que sea su presión.

Tubería de revestimiento (*casing*). Es el conjunto de tuberías de acero que se colocan dentro de un pozo de frente a las formaciones rocosas que han sido perforadas, con objeto de evitar derrumbes de las mismas y/o para aislar zonas con presiones anormales, es decir, diferentes a las del gradiente normal de presión esperado.

Tubería de Producción (*tubing*). Es el medio para transportar el fluido a la superficie y para soportarlo mientras la bomba baja a recoger otra carga.

Pistolas. Es la herramienta formada por cargas explosivas y proyectiles metálicos que se introduce en un pozo, con objeto de detonarla frente a la formación de

interés (zona de disparos) para provocar que los proyectiles perforen la tubería de revestimiento y penetren lo suficiente en la roca, y de esta manera generar canales de comunicación entre el yacimiento y el pozo para la producción de hidrocarburos.

Varillas de bombeo. La sarta de varillas es usada para transmitir el movimiento y la potencia de la unidad de bombeo a la bomba de subsuelo. Son fabricadas en acero y fibra de vidrio. La industria clasifica las varillas de acero en grados C, D, E y K dependiendo de la resistencia a la carga.

Venteo del gas. Consiste en el no aprovechamiento del gas surgente de un pozo de producción de petróleo, que se quema (tipo antorcha) por motivos de seguridad.

Viscosidad. Es una de las características más importantes de los hidrocarburos en los aspectos operacionales de producción, transporte, refinación y petroquímica. La viscosidad, que indica la resistencia que opone el crudo al flujo interno, se obtiene por varios métodos y se le designa por varios valores de medición. El poise o centipoise (0,01 poise) se define como la fuerza requerida en dinas para mover un plano de un centímetro cuadrado de área, sobre otro de igual área y separado un centímetro de distancia entre sí y con el espacio relleno del líquido investigado, para obtener un desplazamiento de un centímetro en un segundo. La viscosidad de los crudos en el yacimiento puede tener 0,2 hasta más de 1.000 centipoise

Yacimiento. Acumulación de aceite y/o gas en roca porosa tal como arenisca. Un yacimiento petrolero normalmente contiene tres fluidos (aceite, gas y agua) que se separan en secciones distintas debido a sus gravedades variantes. El gas siendo el más ligero ocupa la parte superior del yacimiento, el aceite la parte intermedia y el agua la parte inferior.

RESUMEN

TÍTULO: SEMINARIO DE INVESTIGACIÓN, ESTUDIO DE LAS VARIABLES INVOLUCRADAS EN LOS SISTEMAS DE BOMBEO MECÁNICO PARA EL DISEÑO, CONTROL Y OPTIMIZACIÓN DE POZOS EN CAMPO COLORADO.¹

AUTORES²: DIEGO ALBERTO TORRADO SOTO
FERNANDO DÍAZ GÓMEZ
JEFFERSON GIOVANNI VILLAMIZAR LÓPEZ
JORGE HUMBERTO BUITRAGO ROZO
LUIS ANDRÉS AGUILAR GÓMEZ

PALABRAS CLAVES: Bombeo mecánico, cartas dinamométricas, ecuación de onda, nivel de fluido, índice de productividad.

DESCRIPCIÓN:

La Universidad Industrial de Santander – UIS y La Empresa Colombiana de Petróleos – ECOPETROL S.A., firmaron el Convenio Interadministrativo de Cooperación Empresarial con fines Científicos y Tecnológicos, por medio del cual la compañía estatal petrolera hizo entrega a la UIS del Campo Colorado. Esta alianza se constituye en la primera experiencia nacional en materia de interacción académica - industria en el sector hidrocarburos.

Con este convenio se busca fortalecer la formación integral de los estudiantes al incorporar un componente práctico en sus programas académicos y desarrollar proyectos de investigación y apropiación tecnológica. Para optimizar el comportamiento de sistemas por bombeo mecánico de Campo Colorado es importante identificar y entender los problemas que reducen la rentabilidad. Se pretende crear una base metodológica y conceptual para la comprensión de los fundamentos del bombeo mecánico y el uso inteligente de las actuales tecnologías.

Grandes ahorros e incrementos en los ingresos son posibles si optimizamos el comportamiento del sistema por bombeo mecánico usando tecnología moderna. Este seminario ayudara a entender los principios básicos del bombeo mecánico y a familiarizar la tecnología moderna de diagnóstico, para establecer una base procedimental como sustento científico para la posterior realización de proyectos específicos como el desarrollo de software e implementación de sistemas automatizados en los pozos de Campo Colorado.

¹ Trabajo de grado.

² Universidad Industrial de Santander, Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas, Escuela de Ingeniería Mecánica, Director: MSc. Jorge Enrique Meneses Flórez.

SUMMARY

TITLE: RESEARCH SEMINAR, STUDY OF THE VARIABLE INVOLVED IN ROD PUMPING SYSTEM FOR THE DESIGN, CONTROL, AND OPTIMIZATION OF WELLS IN CAMPO COLORADO.³

AUTHORS⁴: DIEGO ALBERTO TORRADO SOTO
FERNANDO DÍAZ GÓMEZ
JEFFERSON GIOVANNI VILLAMIZAR LÓPEZ
JORGE HUMBERTO BUITRAGO ROZO
LUIS ANDRÉS AGUILAR GÓMEZ

KEY WORDS: Rod pumping, Dynamometer charts, Wave equation, Fluid level, Productivity index.

DESCRIPTION:

The Universidad Industrial de Santander – UIS and the Oil's Colombian Company – ECOPETROL S.A., signed the inter - administrative agreement for Business Cooperation with the purposes about the Science and Technology, by which the state oil company delivered to at UIS the Campo Colorado. This alliance is the first national experience in academic interaction - Industry in the hydrocarbon sector.

With the agreement seeks to strengthen a comprehensive education to all students by incorporating a practical component in their curricular and developing research projects and technological appropriation. Campo Colorado looks to optimize the performance of mechanical pumping systems by identifying and understanding all possible issues that reduce profitability. The idea is to develop a conceptual and methodological basis with the purposes of understand the concept of mechanical pumping and performance a clever way to use modern technologies though a seminar.

The seminar will help to understand basic concepts of mechanical pumping system as well as to be familiar with modern diagnostic technology. The objective of this seminar will establish a baseline procedural and scientific basis for subsequent projects. Once the basic concepts and modern diagnostic technology are establish at Campo Colorado by optimizing the performance of mechanical pumping system with modern technology, it will increase in revenues and have fewer expenses.

³ Trabajo de grado.

⁴ Universidad Industrial de Santander, Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas, Escuela de Ingeniería Mecánica, Director: Ing. Jorge Enrique Meneses Flórez.

INTRODUCCIÓN

El bombeo mecánico es el método de levantamiento artificial más comúnmente usado en la producción de petróleo. Más de las dos terceras partes de los pozos productores en el mundo son explotados con este mecanismo.

El bombeo mecánico, al igual que los demás sistemas artificiales de producción, presenta ventajas y desventajas. Entre las ventajas, se considera que son versátiles, de fácil diseño, intercambiable con otros pozos, entre otros. Pero el hecho de que sea el sistema más antiguo y popular no significa que sea el más sencillo y eficiente. Al contrario, su relativa complejidad mecánica hace obligatoria una supervisión permanente a su operación.

El uso ineficiente de la energía es uno de los problemas operacionales más comunes que tienen los sistemas de levantamiento artificial por bombeo mecánico.

Una operación ineficiente del sistema de bombeo trae consigo un incremento de las fallas de la tubería, bomba y varillas, lo cual deja como secuela un aumento en los costos de mantenimiento, siendo necesario establecer una acción preventiva, rápida y efectiva de identificación de las causas que originan las fallas y la implementación de los métodos adecuados para controlarlas ó minimizarlas.

Debido a los altos costos de mantenimiento, se requiere mantener todos los sistemas de bombeo a su máxima eficiencia y con tiempo prolongados entre fallas.

Los análisis de los sistemas de bombeo dependen de las mediciones de carga, posición, y aceleración de la barra pulida, potencia del motor, presiones en el revestimiento, y el nivel de fluido en el anular.

Estas medidas son usadas para caracterizar la operación de los elementos del sistema de bombeo con el uso de modelos teóricos que describen la dinámica de los fluidos y el conjunto mecánico.

Todavía existe poco entendimiento del comportamiento de la bomba bajo las condiciones singulares del pozo, particularmente la relación entre la presión del fluido que pasa a través de la bomba y las fuerzas desarrolladas tanto en el subsuelo como en la superficie.

El objetivo del presente trabajo es contribuir al estado del arte de los sistemas de levantamiento artificial por bombeo mecánico, como una herramienta para la toma de decisiones que permitan al aumento de la producción, la disminución de los costos de mantenimiento y el uso racional y eficiente de la energía en campo colorado.

I. SEMINARIO DE INVESTIGACIÓN

1. GENERALIDADES DEL SEMINARIO DE INVESTIGACIÓN

1.1 QUÉ ES EL SEMINARIO DE INVESTIGACIÓN⁵

El Seminario de Investigación, también conocido como Seminario Alemán, es una actividad académica, cuyo origen se dio a finales del siglo XVIII en la Universidad de GOTTINGEN de Alemania, para renovar las estrategias de estudio y formación de los investigadores⁶, y demostrar que la docencia y la investigación se pueden unir y complementar para obtener mejores resultados.

Consiste en estudiar, discutir e intercambiar experiencias acerca de un tema en particular, en un grupo, en el cual sus participantes, se intercomunican exponiendo dicho tema (la Relatoría), complementándolo, evaluándolo (Correlatoría), aportando entre todos (la Discusión), sacando conclusiones y planteando nuevos interrogantes permitiendo que todo ello quede en la memoria escrita (el protocolo)⁷.

El Seminario de Investigación se programa por temas los cuales son seleccionados con la orientación del director del seminario, quien con su experiencia y conocimiento del tema central, guía la selección con la debida pertinencia, actualidad y ubicación en el contexto. Los temas son desarrollados en sesiones planificadas, en las cuales, los miembros del grupo deben asumir diferentes roles, de acuerdo con la descripción anterior, manteniendo una relación de interés y compromiso con el conocimiento, sin jerarquías, en un clima de colaboración y participación activa.

⁵ Universidad Industrial de Santander. Lineamientos para el seminario de investigación como modalidad para el desarrollo del trabajo de grado. Vicerrectoría académica. Septiembre de 2007.

⁶ Néstor H. Bravo Salinas, El seminario Investigativo – El seminario como práctica pedagógica para la formación integral.

⁷ Carlos M. Vélez S, Resumen El Seminario Investigativo, basado en el Simposio permanente sobre la Universidad 1990-1992 ASCUN.

1.2 OBJETIVO DEL SEMINARIO DE INVESTIGACIÓN

Formar a los participantes para la investigación científica mediante el desarrollo de habilidades específicas aplicadas al asumir los diferentes roles dentro del seminario. Dichas habilidades están orientadas a desarrollar la capacidad de lector crítico de resultados de investigación en cualquiera de las áreas del conocimiento, a fortalecer la capacidad de observar e identificar los problemas presentes en temas bajo análisis, a buscar respuestas a preguntas claves y sustentarlas teórica y metodológicamente en forma verbal y por escrito, y a identificar las relaciones del problema objeto de estudio con el contexto económico, político o social, a fin de enriquecer con una mirada de integralidad, el conocimiento para el grupo de estudiantes. Para ello se programan y ejecutan ejercicios estructurados que permiten a los estudiantes desarrollar competencias iniciales de investigador, avanzar en el conocimiento y aportar buenas revisiones y análisis sobre tópicos que pueden facilitar el desarrollo de la investigación.

Para alcanzar dicho objetivo es preciso que haya una formación desde el trabajo personal hacia el trabajo en equipo; para esto, cada participante debe reconocer sus intereses, estilos de aprendizaje, su capacidad para aprender en interacción con pares; debe apropiarse de la metodología e instrumentos con los cuales trabajará, con el fin de lograr, al interactuar con los demás miembros del grupo en las sesiones del seminario, compartir, criticar y corregir las ideas que surjan de él, en un ambiente de la colaboración mutua.

Los seminarios de investigación, no se enfocan hacia la repetición de trabajos ya realizados, sino hacia la búsqueda de respuestas con nuevos argumentos; por tal razón los trabajos que se deriven del cumplimiento del objetivo del Seminario, deben caracterizarse por su originalidad y estar acordes al nivel científico de formación de sus participantes.

1.3 VENTAJAS DEL SEMINARIO DE INVESTIGACIÓN

El seminario de investigación, como herramienta para el desarrollo integral, presenta las siguientes ventajas:

- Permite a los participantes contar con un director (profesor) durante el seminario, el cual les guía hacia la consecución de los propósitos establecidos, y además, resuelve las dudas e inquietudes o en su defecto, orienta sobre las fuentes de consulta y ayuda a los miembros del grupo en la búsqueda para suplir las necesidades de información.
- Fortalece el hábito de documentarse acerca del tema bajo estudio. Para esto los participantes recurren a fuentes bibliográficas, bases de datos, textos de referencia obligada; este ejercicio refuerza el desarrollo de las competencias interpretativas, argumentativas y propositivas; les permite apropiarse y aprender de los métodos que emplearon los autores de los artículos y textos, así como también, reconocer su valor y aporte a la investigación.
- Permite que los participantes desempeñen diferentes roles dentro del grupo, desarrollando habilidades comunicativas y de relaciones interpersonales, complementarias para la formación tanto personal como profesional.
- Fomenta el aprendizaje como una experiencia grupal, permite experimentar la eficiencia del trabajo en equipo y si el grupo está conformado con estudiantes de diferentes áreas del conocimiento, la riqueza de la interdisciplinariedad, características todas aplicables y necesarias en el desempeño laboral del mundo de hoy.
- Permite el uso de distintas herramientas didácticas de apoyo al desarrollo de las sesiones, así como un control sobre la planificación establecida de éstas.

- Es una metodología integradora centrada en el estudiante, con amplio potencial para fortalecer la habilidad de aprender a aprender, fundamental para tomar el perfil del ciudadano del siglo XXI, quien deberá asumir el compromiso de aprender a lo largo de la vida, como la plantea J. Delors⁸. Sus ventajas la hacen aplicable a todas las áreas del conocimiento humano y no solo a algunas como equivocadamente pudiera pensarse⁹.

1.4 CARACTERÍSTICAS

El seminario de investigación posee las siguientes características:

- Participación activa de todos los miembros del seminario, puesto que no solo el director (profesor) interviene, sino también todos los integrantes del grupo realizan su aporte desde el rol que estén desempeñando. En este proceso los participantes siendo discípulos empiezan a recorrer el camino hacia Maestros.
- El Seminario de Investigación está conformado por un grupo reducido, de aprendizaje activo y cooperativo, inducido a investigar, reflexionar, descubrir y concluir.
- Empleo del diálogo permanente para compartir los conocimientos adquiridos.
- Ambiente amable y cooperativo fomentando la mayor participación de los integrantes del grupo.
- Sesiones desarrolladas utilizando medios didácticos de apoyo al aprendizaje.

⁸ Jaques Delors et al. La Educación Encierra un Tesoro. Informe a la UNESCO de la Comisión Internacional sobre la educación para el siglo XXI. Paris, 1996.

⁹ Carlos M. Vélez S, Resumen El Seminario Investigativo, basado en el Simposio permanente sobre la Universidad 1990-1992 ASCUN.

- La estructura del seminario y todas las actividades y parámetros para desarrollarlas, son planificados en la primera sesión.
- El seminario de investigación exige a los participantes una alta responsabilidad para lograr la preparación adecuada, que les permita tener bases para llevarlo a cabo.

1.5 ORGANIZACIÓN DEL SEMINARIO DE INVESTIGACIÓN

El Seminario de Investigación se compone de las siguientes actividades: la Relatoría, la Correlatoría, la Discusión y el Protocolo, las cuales deben girar en torno a un tema, del que se desprenden los subtemas a tratar durante las sesiones.

Dichas actividades son responsabilidad de los integrantes del grupo, por lo cual a cada uno de ellos es asignado un rol, de carácter rotativo; es así como una persona que en una sesión asume el rol de correlator, en la siguiente puede ser el protocolante, es decir el responsable del protocolo.

La organización del seminario también implica establecer el lugar del seminario, el número de sesiones y las fechas para realizarlas, así como la duración de cada una de las actividades (Relatoría, Correlatoría, Discusión y Protocolo).

El seminario de investigación: estudio de las variables involucradas en los sistemas de bombeo mecánico para el diseño, control y optimización de pozos en Campo Colorado, está compuesto por:

Director: Msc. JORGE ENRIQUE MENESES FLÓREZ

Integrantes: DIEGO ALBERTO TORRADO SOTO
 FERNANDO DÍAZ GÓMEZ
 JEFFERSON GIOVANNI VILLAMIZAR LÓPEZ
 JORGE HUMBERTO BUITRAGO ROZO
 LUIS ANDRÉS AGUILAR GÓMEZ

1.5.1 Tema del seminario de investigación

El seminario de investigación en el *estudio de las variables involucradas en los sistemas de bombeo mecánico para el diseño, control y optimización de pozos en campo colorado*, es una estrategia de aprendizaje activo, novedoso y didáctico que tiene como propósito brindar a los estudiantes elementos fundamentales con los que puedan reconocer, definir y estructurar los conceptos y relaciones existentes entre diversos temas ligados al bombeo mecánico. Por otro lado, permite identificar y establecer desde un principio las bases teóricas de una investigación científica, lo que funciona como una herramienta de formación basándose tanto en el trabajo personal como en equipo y complementándose con la dirección y orientación de un docente. El seminario de investigación en investigación, en instrumentación y variables involucradas en el estudio de unidades de bombeo mecánico de crudo, es una modalidad de proyecto de grado que busca proponer una base de información y análisis.

1.5.2 Dirección del seminario de investigación: estudio de las variables involucradas en los sistemas de bombeo mecánico para el diseño, control y optimización de pozos en Campo Colorado.

La dirección del seminario de Investigación estudio de las variables involucradas en los sistemas de bombeo mecánico para el diseño, control y optimización de pozos en Campo Colorado, estuvo a cargo del profesor: MSc. JORGE ENRIQUE MENESES FLÓREZ. Su principal función fue orientar y liderar la investigación, brindando la asesoría requerida para encaminar los trabajos y tareas hacia el cumplimiento de lo programado.

El profesor (director) es un líder con capacidad para motivar al grupo hacia la intervención activa desde la apropiación de los roles que se vayan asumiendo, mostrando que ésta es fundamental para enriquecer el desarrollo del seminario.

El profesor (director) vela por mantener la cohesión del grupo y un adecuado ambiente de trabajo, e interviene durante las sesiones corrigiendo y complementando las opiniones de los participantes, propiciando el debate en el cual los miembros del grupo puedan mostrarse como personas con poder de decisión, así como con capacidad para la expresión oral, la argumentación y la participación crítica durante el seminario.

1.5.3 Desempeño de los roles

Relatoría:

La relatoría o relación es el procesamiento a través del cual el RELATOR expone el tema correspondiente en la sesión del seminario. El relator tiene como misión principal enriquecer, como resultado de su investigación y estudio, el saber de los demás, buscando por medio de una argumentación rigurosa, aportar algo nuevo que permita avanzar en el conocimiento sobre el objeto de estudio¹⁰.

Correlatoría:

Consiste en la complementación y enriquecimiento de la relatoría por parte de un correlator, el cual debe estar muy atento a la exposición del relator, pues no debe repetir lo expuesto, sino evaluar el contenido, la claridad y el manejo de la exposición, con el fin de plantear su reflexión personal, y su posición frente a la relatoría, de una manera crítica, destacando los aportes más relevantes de la relatoría motivando a los participantes al debate.

¹⁰ Néstor H. Bravo Salinas. El Seminario Investigativo, El Seminario como práctica pedagógica para la formación integral.

Discusión:

Es el medio a través del cual los participantes con base en lo expuesto en la relatoría y la argumentación del correlator, confrontan sus concepciones y apreciaciones sobre el tema. Esta dinámica se desarrolla a manera de discusión, la cual se caracteriza por ser de carácter positivo, argumentativo y enfocado al enriquecimiento del trabajo en grupo. La discusión requiere participación oportuna y respeto por las opiniones de los demás, criticándolas constructivamente.

Protocolo:

El protocolo es la evidencia escrita de cada sesión del seminario y un insumo para la elaboración del informe final. Éste debe ser leído antes de comenzar cada sesión, ya que es un acta de registro de lo ocurrido en la anterior y de los compromisos planteados. Su autor es el protocolante, el cual plasma en un documento las actividades tal y como fueron desarrolladas, utilizando una redacción clara y concisa.

1.6 METODOLOGÍA

Para llevar a cabo el Seminario de Investigación estudio de las variables involucradas en los sistemas de bombeo mecánico para el diseño, control y optimización de pozos en Campo Colorado satisfactoriamente debe haber una adecuada planeación y organización con el propósito de garantizar la fluidez de las sesiones y el cumplimiento de los objetivos planteados para el seminario. Por ello para este fin se definió una metodología a desarrollar la cual está organizada en diferentes etapas que se realizan dentro de la dinámica del seminario, se pueden agrupar en tres grandes grupos: Planeación, ejecución y finalización; las cuales se relacionan entre sí, dependiendo cada una de la anterior.

2. PLANEACIÓN

En esta etapa se establecen los lineamientos bajo los cuales se desarrolla el seminario, se definen los alcances y resultados que se esperan obtener mediante la selección del tema, el estudio bibliográfico, los subtemas; y la planificación de las sesiones.

Los alcances y objetivos iniciales del seminario son:

- Elaborar un documento síntesis original donde se recojan los resultados de la investigación y la discusión realizada en cada sesión a partir de los resúmenes, las relatorías recopiladas y los protocolos en el seminario de investigación de acuerdo con los temas establecidos para el seminario (Ver Tabla 1).
- Cumplir con los roles asignados a cada integrante del seminario de investigación (Ver Tabla 2).
- Elaborar presentaciones en PowerPoint y documentos síntesis de cada uno de los temas investigados, obtenidos de los las relatorías y los protocolos recopilados de cada sesión (Ver Tabla 1).
- Presentar el estado del arte con respecto a las metodologías usadas para el análisis y la interpretación de algunos software comerciales (Total Well Management, RODDIAG, RODSTAR-D, etc).

Objetivo propuesto durante el desarrollo del seminario:

- Usar Matlab como lenguaje de programación, para el desarrollo de software referentes al diseño del sistema de bombeo mecánico (ecuación de onda, método predictivo API RP 11L).

2.1 ESTUDIO BIBLIOGRÁFICO

Antes de iniciar el Seminario de investigación se definió la bibliografía para estudiar el tema seleccionado. Cada uno de los integrantes se documentó acerca de él, dependiendo de sus requerimientos, consultando dicha bibliografía. En el transcurso del Seminario se recurrió a otras fuentes que aportaron más información a la investigación.

Se indagó sobre esta bibliografía que se empleó para la profundización del tema durante la ejecución del seminario.

- **J.J. DaCundha, SPE 108762 (2007) modeling a finite-length sucker rod using the semi-infinite wave equation an a proof of Gibbs's conjecture.**

En este artículo se estudia la ecuación de onda semi-infinita en el dominio del espacio para modelar las ondas longitudinales que se propagan en una varilla larga, esbelta, homogénea y elástica.

- **Juan Pablo Sanchez, SPE 108112 (2007) Beam pumping systems optimization through automation**

Este artículo presenta los beneficios teóricos y prácticos obtenidos con la inclusión de RPC's (Rod pumping controls) en sistemas de bombeo mecánico.

- **F. Yavuz, SPE 94326 (2005) Wave Equation Simulation of Fluid Pound and Gas Interference**

Este artículo examina el fenómeno del golpe de fluido e interferencia de gas interpretados a través de la ecuación de onda.

Se muestra como una baja presión de gas en la bomba produce el golpe de fluido y a su vez como una alta presión de gas en la bomba promueve la llamada interferencia de gas.

- **J. McCoy, SPE 37499 (1997) Motor Power/Current Measurement for Improving Rod Pump Efficiencies**

Este artículo describe como realizar de manera fácil y detallada un análisis de eficiencia del sistema de bombeo a partir de la medida digital instantánea de potencia durante la carrera de la bomba. La eficiencia es luego usada como un punto de referencia para determinar si un completo análisis de pozo es justificado desde el punto de vista de hacer el mejor uso del personal y los recursos económicos para aumentar la producción de petróleo.

- **M. A. Barreto Filho, SPE 36605 (1996) Automatic downhole card generation and classification**

Este artículo describe las más importantes características del algoritmo de filtración de ruido en la generación de la carta dinagráfica de fondo. Muestra como la programación matemática lineal y las redes neuronales son usadas para la clasificación de cartas dinagráficas de fondo y presenta resultados a diferentes condiciones de bombeo.

- **Roberto L. Soza, SPE 35217 (1996) Review of Downhole Dynamometer Testing**

Este artículo muestra una comparación entre la carta dinagráfica de fondo calculada con modelos predictivos y de ecuación de onda, y las cartas obtenidas directamente con una celda electrónica de carga de fondo para validar tales modelos.

- **J.E. Chacin, SPE 16918 (1987) A New Model for Studying Oilwell Pumping Installations**

Este artículo presenta un estudio acerca de un modelo discreto desarrollado para el diagnóstico de bombas bajo ciertas condiciones de operación.

- **S.G. Gibbs, SPE 27988 (1994) Assumptions of the API Rod Pumping Design Method as Related to Practical Applications and Wave Equation Techniques**

Este artículo examina las premisas básicas de el método API y como esto afecta su exactitud y aplicabilidad. Una comparación es hecha con las técnicas de ecuación de onda las cuales son muy usadas.

- **Khodabandeh, SPE 23429 (1991) A Simple Method for Predicting the Performance of a Sucker-Rod Pumping System**

Este artículo presenta una simple y eficiente aproximación para predecir el comportamiento dinámico de una sarta de varillas. Se muestra la importancia de este comportamiento para la predicción del rendimiento de un sistema de bombeo.

- **S.D.Lekia, SPE 18548 (1988). An Improved Technique for the Evaluation of Performance Characteristics and Optimum Selection of Sucker-Rod Pumping Well Systems**

Este artículo presenta un método mejorado para la evaluación de las características del rendimiento y la selección óptima del sistema de bombeo mecánico. Este nuevo método agrupa las más importantes variables que afectan la operación del sistema de bombeo mecánico en 11 parámetros adimensionales los cuales son usados para la simulación de las características de diseño y rendimiento.

- **J.E. Chacin, SPE 18829 (1989) A Numerical Approach to the Diagnosis of Sucker Rod Pumping Installations and Its Verification with Downhole Pump Field Measurements**

Este artículo presenta una investigación acerca de las limitaciones de las técnicas para establecer las condiciones de fondo a partir de medidas en la barra pulida y

se propone una nueva aproximación diagnóstica numérica más flexible y con mayor exactitud.

- **T.A. Everitt, SPE 18189 (1992) an improved finite-difference calculation of downhole dynamometer cards for sucker rod pumps**

Este artículo expone una representación en diferencias finitas de la ecuación de onda desarrollada para el análisis de sistemas de bombeo mecánico. También es presentado un método consistente de cálculo del término de amortiguamiento viscoso asociado a la ecuación de onda amortiguada.

- **J.F. Lea, SPE 18187 (1992) Dynamic measurement of beam-pump parameters**

En este artículo se muestra la manera de tomar medidas eléctricas y mecánicas en unidades de bombeo mecánico convencional. Además se comparan estas variables con valores calculados, ilustrando como las técnicas de cálculo modelan los datos medidos.

- **J.G. Svinos, SPE 17789 (1988) Successful Application of Microcomputers To Analyze Sucker Rod Pumps**

Este artículo muestra como implementar el uso de microcomputadores para analizar los datos recopilados a partir de un dinamómetro portátil.

- **W.H. Ford, SPE 17444 (1988) Effective Application of Beam Pumping Diagnostics**

Este artículo presenta los desarrollos en software llevados a cabo por la compañía Chevron oil company para el diagnóstico de problemas en el sistema de bombeo mecánico. El software utilizado (SADA) emplea la ecuación de onda para modelar la sarta de varillas y el comportamiento cinemático de la unidad de bombeo.

- **D.J. schaffer, SPE 16919 (1987) An investigation of analytical and numerical sucker rod pumping mathematical models**

Este artículo detalla un estudio hecho de los modelos analíticos (diagnóstico) y numéricos (predictivo) comúnmente utilizados en el análisis y diseño de sistema de bombeo por varillas.

- **James McCoy, SPE 14254 (1988) Acoustic determination of producing bottomhole pressure**

Este artículo expone la determinación acústica de la presión de fondo de producción. Dos técnicas son presentadas para pozos que tienen líquido sobre la formación y gas fluyendo ascendentemente a través de la columna de líquido.

- **J. McCoy, SPE 13810 (1985). Acoustic Static Bottomhole Pressures**

Este artículo muestra un método sencillo para un cálculo exacto de la presión estática de fondo medida acústicamente con presiones superficiales arriba de 1500 Psi en ambientes corrosivos. También, una técnica especial es recomendada para el disparo en el pozo, el cual en la mayoría de los casos ofrecerá resultados más exactos.

- **S. G. Gibbs, SPE 4068 (1973) Wellsite Diagnosis of Pumping Problems Using Minicomputers**

Este artículo describe un sistema para la implementación de un método que permite obtener la máxima cantidad de información proveniente de un dinamómetro usando las series de Fourier aplicadas a la ecuación de onda.

- **S. G. GIBBS, SPE 1165-PA (1966) Computer diagnosis of down-hole conditions in sucker rod pumping wells**

Este artículo describe un método orientado a computador mediante el cual puede determinar la carta dinagráfica de fondo a partir de los datos medidos con un

dinamómetro en la barra pulida. Además se muestran los problemas que pueden ser diagnosticados a partir de estos datos.

- **eProduction Solutions, Value of Rod Pump Control**

Este artículo documenta los beneficios económicos y operativos atribuidos a la instalación de RPC's (Rod pumping control) en pozos de bombeo mecánico además de examinar los problemas más comunes asociados a este sistema de bombeo.

- **Mohamed Ghareeb, The value of beam pumping system automation**

Este artículo presenta la experiencia ganada a través de la implementación de un sistema inteligente de bombeo mecánico en campo Khalda en el oeste del desierto de Egipto. También muestra la contribución del SWM (Smart well Manager) en la reducción de intervenciones en el pozo, predicción de fallas de pozo, disminución de costos de energía etc.

- **James McCoy, Timer control of beam pump run time reduces operating expense**

Este artículo muestra como el control de pozos con una bomba de capacidad superior a la rata de influjo de pozo, puede mejorar la eficiencia del sistema y bajar los costos operativos mediante la instalación de un dispositivo temporizador.

- **J. McCoy, improved analysis of acoustic liquid level depth measurements using a dual channel analog/digital strip chart recorder**

Este artículo describe un nuevo instrumento que ha sido desarrollado para medir la distancia al nivel de líquido en el anular del casing.

- **S.G. Gibbs, Predicting the behavior of sucker rod pumping systems**

En este artículo se presenta un nuevo método para predecir el comportamiento de un sistema de bombeo por varillas. El sistema de bombeo es descrito por un

modelo matemático flexible el cual es solucionado por medio de ecuaciones diferenciales parciales con la ayuda de computadores.

- **S.G. Gibbs, Monitoring and Controlling Rod Pumped Wells Using Downhole Pump Cards**

Este artículo describe varios métodos para el control pump-off usando la carta dinográfica de fondo. También se presenta un método de control continuo para los sistemas de bombeo utilizando variadores de frecuencia con el fin de tener una unidad con velocidad en el motor variable (no stop control).

- **Waltone. gilbert, An Oil-Well Pump Dynagraph**

Este artículo describe un instrumento de fondo de pozo para medir el comportamiento del pistón en la bomba. Se exponen también los métodos para la interpretación de los datos tomados.

- **Echometer, Well Analyzer and TWM Software Operating Manual**

Este manual ilustra cómo usar el software para gerencia de datos tomados en el pozo a partir del registro acústico y la elaboración de dinagramas.

- **Por John Svinos, Bombeo Mecánico Avanzado .Theta Enterprise**

Este libro proporciona una información clara y pedagógica, en la cual se desarrolla una sólida comprensión de los principios básicos del bombeo mecánico y se expone la tecnología moderna de diagnóstico. Se aporta, a la vez, un fundamento para el diseño e identificación de problemas tanto en la unidad superficie como en el fondo del pozo.

- **PDVSA, Diseño de Instalaciones de Levantamiento Artificial por Bombeo Mecánico.**

En este texto se presentan los tópicos concernientes al diseño en bombeo mecánico, su evolución, sus consideraciones, las limitaciones y ventajas del

método, y los fundamentos básicos necesarios para desarrollar un criterio de diseño eficiente para éste sistema de levantamiento.

- **Ing. Héctor Partidas, Bombeo Mecánico Optimización, Diagnóstico y Operación.**

Este libro presenta el estudio de los componentes básicos, Cinemática y cinética del sistema de Bombeo Mecánico, además de presentar un análisis diagnóstico de los diferentes tipos de problemas que este sistema puede presentar.

- **Cristian Fernando Mateus Marin, Daniel Mauricio Rojas Cárdenas, Análisis Y Diagnóstico De Problemas En El Equipo De Subsuelo De Unidades De Bombeo Mecánico Utilizando Redes Neuronales.**

Esta Tesis de Grado presenta una alternativa para la interpretación de dinagramas la cual realiza un análisis no solo cualitativo, si no cuantitativo, y además proporciona agilidad y rapidez en el reconocimiento de problemas en el equipo de subsuelo previniendo daños.

- **Dr. Jose Carlos Miranda, Notas de Clase Mecanismos.**

Las notas contenidas en este libro nos permiten estudiar y analizar de una forma profunda la cinemática y cinética de los diferentes tipos de mecanismos.

- **Patricia Flórez Dulcey, Evaluación del Desempeño del sistema de Bombeo Mecánico en los pozos de Campo Yarigui-Cantagallo a partir de registros TWM e información de producción.**

Esta Tesis de Grado expone los trabajos hechos que a nivel de producción un análisis certero puede ser muy confiable con el uso de paquetes comerciales como simuladores y analizadores de pozo: Total Well Management (TWM).

2.2 DESCRIPCIÓN DE LOS SUBTEMAS

Tabla 1. Especificación de los temas y subtemas

1. INTRODUCCIÓN AL SISTEMA DE BOMBEO MECÁNICO.
1.1. Introducción a los sistemas de bombeo mecánico. 1.2. Sistemas de extracción artificial. 1.3. El bombeo mecánico y sus partes. 1.4. Distribución de flujo y transferencia de energía.
2. EQUIPO DE FONDO.
2.1. Componentes de una bomba de profundidad. 2.2. Clasificación API 11AX. 2.3. Bombas de tubería y bombas insertables. 2.4. Pistones. 2.5. Válvulas. 2.6. Funcionamiento.
3. SARTA DE VARILLAS.
3.1. Materiales y dimensiones de la sarta de varillas. 3.2. Varillas API y varillas NO API. 3.3. Fuerzas aplicadas a la sarta de varillas. 3.4. Esfuerzos en las varillas de bombeo. 3.5. Fallas de las varillas de bombeo.
4. SISTEMA DINAMOMÉTRICO
4.1. Introducción al registro de cargas a partir de la dinamometría de superficie. 4.2. Tipo de instalaciones y usos en el campo. 4.3. Cargas actuantes en el sistema de bombeo mecánico.
5. DINÁMICA DEL BOMBEO MECÁNICO
5.1. Análisis cinemático de la unidad de bombeo mecánico 5.2. Introducción al cálculo del torque 5.3. Factor torque 5.4. Cálculo práctico del torque 5.5. Diagrama de cargas permisibles. 5.6. Requerimientos de potencia y eficiencia.

6. DISEÑO DEL SISTEMA	
6.1.	Ecuación de la onda
6.2.	Modelamiento matemático del comportamiento de la sarta
6.3.	Método API RP 11L. recommended practice for design calculations for sucker-rod pumping systems (conventional units)
6.4.	Relación de comportamiento de flujo. curvas IPR (<i>inflow performance relationship</i>).
7. ANÁLISIS DINAMOMÉTRICO	
7.1.	Introducción al registro de cargas a partir de la dinamometría de superficie.
7.2.	Introducción a la dinamometría de fondo.
7.3.	Análisis de la dinamometría de fondo.
7.4.	Diagnóstico de problemas de fondo a partir de cartas dinamométricas.
8. MEDICIONES ACÚSTICAS DE NIVEL	
8.1.	Introducción a las mediciones acústicas de nivel.
8.2.	Presión estática de fondo.
8.3.	Presión de fondo fluyendo.
9. OPTIMIZACIÓN DEL SISTEMA A PARTIR DEL ANÁLISIS DINAMOMÉTRICO Y MEDICIONES ACÚSTICAS DE NIVEL	
9.1.	Optimización de la producción a partir de análisis dinamométrico.
9.2.	Diagnóstico de fallas o pérdidas de producción.
9.3.	Diagnóstico y optimización de fallas por fugas en el sistema.
9.4.	Cálculo de escurrimiento en la válvula viajera.
9.5.	Interpretación de datos para la toma de decisiones.
10. SISTEMAS DE CONTROL Y MONITOREO DE BOMBEO	
10.1.	Introducción a los sistemas de control
10.2.	Golpe de fluido
10.3.	Temporizadores
10.4.	Controladores automáticos de bombeo (RPC, rod pumping control)
11. ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE SOFTWARE COMERCIALES	
11.1.	TOTAL WELL MANAGEMENT (Empresa ECHOMETER.CO)
11.2.	GOTHETA ENTERPRISE.

Fuente. Autores.

2.3 PLANEACIÓN DE LAS SESIONES

Tabla 2. Organización de las sesiones

TEMAS	SESIONES
1	1ª sesión
2	2ª sesión
3	3a sesión
4	4ª sesión
5	5ª sesión
6.1-6.2	6ª sesión
6.3-6.4	7ª sesión
7.1-7.2	8ª sesión
7.3-7.4	9ª sesión
8	10ª sesión
9.1-9.2-9.3	11ª sesión
9.4-9.5	12ª sesión
10.1-10.2-10.3-10.4	13ª sesión
10.5-10.6-10.7-10.8	14ª sesión
11.1	15ª sesión
11.2	16ª sesión

Fuente. Autores.

Tabla 3. Rol asignado a los participantes del proyecto en las diferentes sesiones

Expositor	JORGE MENESES	LUIS AGUILAR				JEFFERSON VILLAMIZAR				JORGE BUITRAGO				FERNANDO DÍAZ				DIEGO TORRADO					
		A	C	P	R	D	C	P	R	D	C	P	R	D	C	P	R	D	C	P	R	D	
1ª sesión	X	X							X				X		X							X	
2ª sesión	X		X					X		X							X						X
3ª sesión	X				X	X							X			X					X		
4ª sesión	X				X		X					X		X									X
5ª sesión	X			X					X	X							X	X					
6ª sesión	X				X			X		X							X		X				
7ª sesión	X				X	X						X			X								X
8ª sesión	X	X							X	X							X					X	
9ª sesión	X		X						X				X			X		X					
10ª sesión	X			X			X						X	X									X
11ª sesión	X	X					X					X					X						X
12ª sesión	X				X				X	X				X								X	
13ª sesión	X				X			X					X		X				X				
14ª sesión	X		X						X	X						X							X
15ª sesión	X			X		X							X				X		X				
16ª sesión	X	X					X							X			X					X	

A	APERTURA
R	RELATOR
C	CORRELATOR
P	PROTOCOLANTE
D	DISCUSIÓN

Fuente. Autores

3. EJECUCIÓN

3.1 DOCUMENTACIÓN PARA LOS SUBTEMAS

El relator elaboró un documento con normas técnicas y metodología científica acerca de su exposición, el cual debe ser revisado por el director. Previo a cada una de las sesiones, los integrantes del grupo, indiferentemente del rol que desempeñaron, estudiaron dicho documento y la bibliografía definida, con el propósito de participar y aportar al desarrollo de la sesión.

3.2 DESARROLLO DE UNA SESIÓN

Cada una de las sesiones del seminario, a diferencia de la primera, por no tener predecesora, se desarrolló de manera fluida siguiendo el orden de las actividades que aparecen en la tabla 4.

Tabla 4. Desarrollo de una sesión del Seminario de Investigación

ACTIVIDAD		DESCRIPCIÓN	RESPONSABLE
1	Apertura de la sesión	<ul style="list-style-type: none">• Lectura del plan de trabajo.• Verificación de la asistencia.• Confirmación o asignación de roles.• Asignación de los roles para la próxima sesión.	Profesor (Director)
2	Lectura del protocolo	<ul style="list-style-type: none">• Se abre una sesión de preguntas aclaratorias del texto del protocolo.• Los ajustes se consignan en el protocolo siguiente.	Protocolante
3	Relatoría	<ul style="list-style-type: none">• Exposición del tema.• Entrega el trabajo escrito.	Relator
4	Correlatoría	<ul style="list-style-type: none">• Se complementa y evalúa la relatoría.• Se induce a la discusión.	Correlator
5	Discusión	<ul style="list-style-type: none">• Se realizan preguntas, intervenciones y aclaraciones sobre el tema.• Se valida el conocimiento demostrado por el relator.	Todos los participantes
6	Conclusión	<ul style="list-style-type: none">• Evaluación de la sesión.• Síntesis del trabajo.• Redacción del protocolo.• Aprobación de la síntesis y el protocolo.	Participantes Director Protocolante

Fuente. UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER. Lineamientos para el seminario de investigación como modalidad para el desarrollo del trabajo de grado.

3.3 ACTA

SEMINARIO DE INVESTIGACIÓN:



ESTUDIO DE LAS VARIABLES INVOLUCRADAS EN LOS SISTEMAS DE BOMBEO MECÁNICO PARA EL DISEÑO, CONTROL Y OPTIMIZACIÓN DE POZOS EN CAMPO COLORADO.

Fecha:

Tema a Desarrollar:

Sesión:

Relator:

Correlator:

Protocolante:

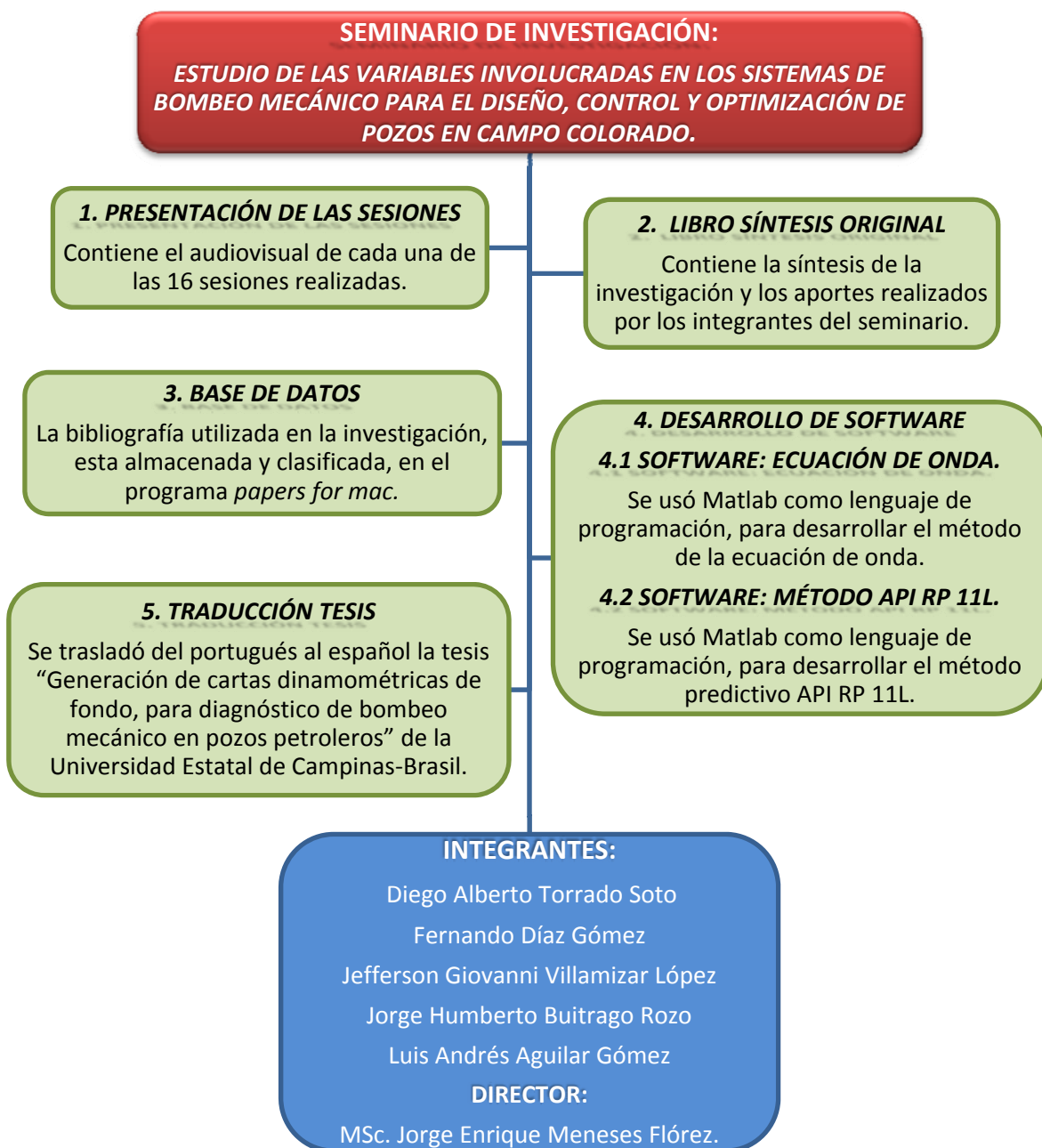
Discusión:

Director:

Observaciones:

4. FINALIZACIÓN

Figura 1. Productos obtenidos en el desarrollo del seminario de investigación.



Fuente. Autores.

El seminario de investigación se realizó en 16 sesiones, para el desarrollo de cada una, se crearon presentaciones en PowerPoint con un ambiente gráfico adecuado, para permitir una fácil comunicación entre el relator y el auditorio. Además fueron grabadas con audio y video, posteriormente editadas, con el fin de tener un producto fácilmente entendible que le sirva de ayuda a la persona que lo requiera.

Se compiló y estructuró un documento síntesis original que contiene la información detallada de cada una de las 16 sesiones, gracias a la investigación y aportes realizados por los integrantes y asistentes del seminario.

La bibliografía consultada para el desarrollo del seminario fue almacenada y clasificada en el programa *papers for mac* que permite maniobrar la información de diferentes maneras, ya sea por el autor, por algún tema en específico, por el año de creación, o incluso por palabras claves. *Papers for mac*, es una herramienta que ayudó a la gestión del Seminario gracias al manejo de los artículos usados en la investigación.

Durante el desarrollo del seminario se estudió en detalle el diseño del sistema mediante la ecuación de onda y el método predictivo API RP 11L. Para el método de la Ecuación de Onda se hizo una simulación del modelo matemático del comportamiento dinámico de la sarta de varillas para la obtención de la carta dinamométrica de fondo a partir de la carta dinamométrica de superficie. Para el método predictivo API RP 11L, se exportaron y se introdujeron curvas junto con el lenguaje de programación para el diseño y cálculos del sistema de bombeo mecánico. En ambos programas se utilizó Matlab como lenguaje de programación.

El método de la ecuación de onda, se desarrolló con base en la tesis “Generación de las cartas dinamométricas de fondo, para diagnóstico de bombeo mecánico en pozos petroleros.” Realizada por Manuel de Almeida Barreto Filho en la Universidad Estatal de Campinas - Brasil. Por este motivo fue necesario traducir

del portugués al español dicha tesis, y se encuentra disponible en formato digital, para la consulta.

4.1 ENTREGABLE 1: PRESENTACIÓN DE LAS SESIONES

El trabajo realizado en un seminario de investigación, debe ser presentado en un foro académico, con el fin que los asistentes afiancen los conocimientos en un tema específico. Para esto se diseñó un formato de presentación que lograra mantener la atención del auditorio y a la vez sirviera de guía al relator.

4.1.1 Características El uso de diapositivas en los foros académicos permite una comunicación dinámica e interactiva entre el relator y los asistentes. También permiten alcanzar los siguientes objetivos:

- Servir de guía al relator.
- Dar un orden lógico a la presentación.
- Favorecer la comunicación entre el relator y los asistentes.
- Captar la atención del público.

Para cumplir con estos objetivos, las presentaciones se realizaron con las siguientes características:

- Se manejaron tres niveles de contenido, (1. Título de primer orden, 1.1 Título de segundo orden, 1.1.1 título de tercer orden), con el fin de ubicar al público en el contexto de la exposición en cualquier instante de tiempo.
- Se incluyó el título del seminario, el logo de la Universidad Industrial de Santander y el de la Escuela de Ingeniería Mecánica, lo que da sentido de pertenencia. Además se incluyó el nombre del relator, con el fin de crear una charla amena con los asistentes.
- El fondo de las diapositivas, es de color azul con destellos de luz, para crear un ambiente agradable a la vista; el color blanco y el tamaño de la letra hacen

más fácil la lectura sin cansar la vista, debido al contraste con el fondo de la diapositiva.

- Se usaron imágenes y animaciones, para facilitar la exposición, además de cumplir con la función nemotécnica¹¹. Esto ayuda a la comprensión de las ideas expuestas por el relator.
- Al inicio de cada sesión, en la primera diapositiva se coloca el título del seminario junto con el nombre de los integrantes y el director, en la segunda diapositiva se da a conocer el tema a desarrollar durante la sesión y en la tercera diapositiva se da inicio a la exposición de la investigación.
- Las sesiones fueron grabadas con audio y video, posteriormente editadas, con el fin de tener un producto fácilmente entendible que le sirva de ayuda a la persona que lo requiera.

Figura 2. Formato de las presentaciones.



The slide features a dark blue background with a light blue gradient on the right side. At the top center, there is a small horizontal strip containing three icons: a white truck, a globe, and an oil pumpjack. Below this strip, the title is displayed in a light blue rounded rectangle with yellow text: "SEMINARIO DE INVESTIGACIÓN: ESTUDIO DE LAS VARIABLES INVOLUCRADAS EN LOS SISTEMAS DE BOMBEO MECÁNICO PARA EL DISEÑO, CONTROL Y OPTIMIZACIÓN DE POZOS EN CAMPO COLORADO." Underneath the title, the names of the participants are listed under the heading "Integrantes:" in white text. At the bottom, the director's name "Director: JORGE ENRIQUE MENESES FLÓREZ." is shown in white, followed by a line for the date "Día/Mes/Año". The footer contains three elements: a circular logo on the left, the seminar title in small white text in the center, and the logo of the Universidad Industrial de Santander on the right.

¹¹ Es el procedimiento de asociación mental de ideas, esquemas, ejercicios sistemáticos, repeticiones, etc. para facilitar el recuerdo de algo.



Nº SESIÓN

Tema a Desarrollar

Protocolo:

Relator:

Correlator:

Director: JORGE E. MENESES FLÓREZ.

Día/Mes/Año



SEMINARIO DE INVESTIGACIÓN: ESTUDIO DE LAS VARIABLES INVOLUCRADAS EN LOS SISTEMAS DE BOMBEO MECÁNICO PARA EL DISEÑO, CONTROL Y OPTIMIZACIÓN DE POZOS EN CAMPO COLORADO.

Universidad Industrial de Santander



Nº SESIÓN

Tema y Subtema desarrollado



SEMINARIO DE INVESTIGACIÓN: ESTUDIO DE LAS VARIABLES INVOLUCRADAS EN LOS SISTEMAS DE BOMBEO MECÁNICO PARA EL DISEÑO, CONTROL Y OPTIMIZACIÓN DE POZOS EN CAMPO COLORADO.

Universidad Industrial de Santander



Relator:

Fuente. Autores

El audiovisual de las 16 sesiones, está disponible en un disco compacto que lleva como título “*Audio visuales de las sesiones del seminario*”, además tiene el título general del seminario, los nombres de los autores y el del director, y los logos de la Universidad Industrial de Santander, la Escuela de Ingeniería Mecánica y de Campo Escuela Colorado. El CD en su interior contiene una carpeta con el nombre “*sesiones seminario*” que almacena los archivos en PowerPoint de cada una de las sesiones realizadas.

Figura 3. CD “Audio visuales de las sesiones del seminario”.



Fuente. Autores.

4.2 ENTREGABLE 2: LIBRO SÍNTESIS ORIGINAL

El documento es la síntesis de la investigación y de los aportes realizados por los integrantes del seminario, los asistentes y el director durante cada una de las sesiones realizadas. El estilo y cuerpo del libro son una creación original enfocada a dar un orden lógico, al fácil entendimiento y a dar un aspecto agradable del mismo.

El documento está dividido en once (11) capítulos y es una recopilación de los temas y subtemas expuestos en cada una de las sesiones contenidos en la tabla 1, siguiendo el mismo orden para tener continuidad y conexión entre ellos.

El documento se elaboró en Microsoft office Word 2007, que es un procesador de texto fácil de usar, versátil y tiene una interfaz agradable y sencilla, además este procesador se ha convertido en estándar de facto¹².

Microsoft office Excel 2007 y Microsoft office Visio 2007, se utilizaron para desarrollar diagramas, tablas, figuras y esquemas taxonómicos. Excel es una herramienta que permite crear hojas de cálculo, graficar variables y de esta forma originar análisis y conclusiones; además es compatible con un lenguaje de programación (Visual Basic). Visio es útil para generar esquemas, diagramas de base de datos¹³, diagramas de oficina, diagramas de flujo de programas y UML¹⁴.

En la carátula del libro se incluyó una imagen alusiva al bombeo mecánico, el título del seminario y los logos de la Universidad Industrial de Santander, la Escuela de Ingeniería Mecánica y de Campo Escuela Colorado, de esta manera se mantiene la identidad con las instituciones involucradas en el seminario.

Cada capítulo inicia con una hoja de presentación que contiene el título y una imagen referente a la temática expuesta en él, esto da al lector un panorama global del contenido. Las páginas internas de los capítulos tienen en el encabezado el número y título del capítulo, en el pie de página se encuentra el logo de la UIS, de la Escuela de Ingeniería Mecánica y de Campo Escuela Colorado respectivamente.

¹² Norma generalmente aceptada y ampliamente utilizada por iniciativa propia de un gran número de interesados.

¹³ Conjunto de datos que pertenecen a un mismo contexto y se almacenan sistemáticamente para un posterior uso.

¹⁴ Lenguaje Unificado de Modelado. Lenguaje grafico para visualizar, construir, especificar y documentar un sistema.

Figura 4. Carátula del libro síntesis original.



Fuente. Autores

Figura 5. Página de inicio de cada capítulo (capítulo 1 en esta imagen).



Fuente. Autores.

Figura 6. Páginas interiores del libro síntesis original.



Fuente. Autores

4.3 ENTREGABLE 3: BASE DE DATOS

La parte más importante de un seminario es la fase de investigación, durante este periodo se busca, consulta, clasifica y almacena toda la información necesaria para estructurar el seminario, en el cumplimiento de esta tarea se usó el programa “Papers for mac” ya que es una herramienta fácil de manejar, clasifica automáticamente cada documento, y permite al usuario acceder a ellos rápidamente.

“Papers for mac” ayuda a organizar más de 85 diferentes tipos de documentos. Papers no solo recibe archivos en PDF, sino que también organiza archivos de texto, hojas de cálculo, presentaciones, hojas escaneadas y mucho más.

Figura 7. Ventajas de “Papers for mac”.



Fuente: <http://www.mekentosj.com/papers/>

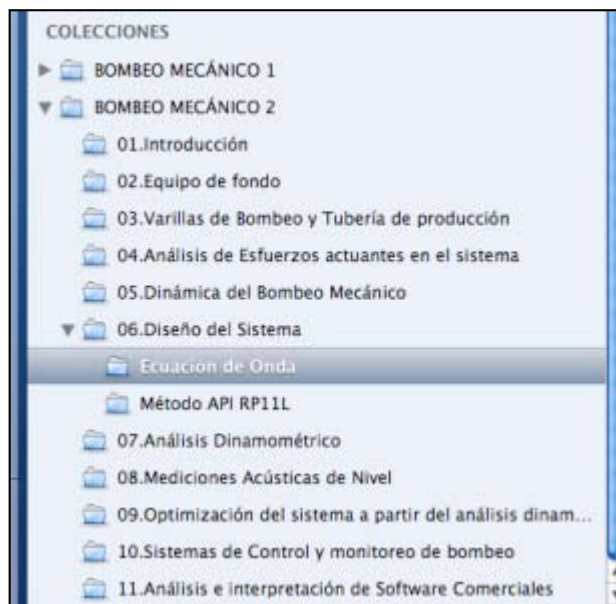
Este software además de organizar los documentos, permite organizar todo lo que viene en ellos. Admite la descarga de documentos y la clasificación de datos complementarios. Si los datos se originan en el sitio web de los editores, o se compone de notas que se tomaron, se pueden añadir las fuentes y referencias automáticamente.

Los trabajos propios tienen un espacio especial, *Papers*, mantiene estos trabajos al alcance en cualquier momento, tan pronto el usuario hace una citación el programa mueve el archivo de la carpeta manuscritos a la biblioteca general. El uso de palabras claves y etiquetas, permite tener una colección más inteligente.

Papers permite importar directamente desde el escáner y organizar al mismo tiempo. Mientras se escanea *Papers* sabe lo que está leyendo, con la ayuda de OCR¹⁵. Esto hace más fácil y rápida la organización y recuperación de archivos.

La herramienta “*Papers Live*”, facilita el intercambio de información, con personas en cualquier lugar del mundo en tiempo real. Además *Papers*, tiene un soporte que sincroniza la información con los dispositivos móviles de Apple (iPhone, iPad, etc.) de esta forma el usuario mantiene los documentos a la mano en cualquier instante y en cualquier lugar.

Figura 8. Organización de la documentación del seminario.



Fuente. Autores

Los documentos utilizados en la investigación, fueron organizados de acuerdo a la estructura establecida en la tabla 1 y clasificados por autor, título y año de publicación en una carpeta con el nombre “bombeo mecánico 2” que se encuentra disponible en la sección colecciones de “*papers for mac*”.

El usuario, al abrir la carpeta “bombeo mecánico 2” despliega automáticamente 11 carpetas que representan los 11 capítulos del documento síntesis original, ver

¹⁵ OCR (Optical Character Recognition). Convierte las imágenes de texto en un texto editable.

figura 8. Cada una de estas, contiene la documentación utilizada en el desarrollo de la temática del capítulo.

Al hacer clic sobre alguna de las carpetas, el programa muestra inmediatamente, la documentación contenida. El usuario con tan solo hacer clic sobre alguno de los documentos puede ver en *papers for mac*, la información básica (título, autor, año de publicación y resumen) de este, sin la necesidad de abrir el archivo, como se muestra en la figura 9.

Figura 9. Lista de la documentación disponible del capítulo 6 “Diseño del sistema”.

The screenshot shows a library application window with a list of documents on the left and a detailed view of a selected document on the right. The list includes columns for Authors, Title, Journal, Year, and Rating. The selected document is 'Predicting the behavior of sucker-rod pumping systems' by S.G. Gibbs, published in the Journal of Petroleum Technology in 1963. The detailed view on the right includes a description of the document, its identifier, citation key, type, and import status.

Autores	Título	Revista	Año	Puntuación
SG Gibbs, KB Nolen	Wellsite Diagnosis of Pumping Problems Usin...	Journal ...	1973	
J Lea, J Cox, H Ni...	Wave Equation Simulation of Fluid Pound and ...	SPE Pro...	2005	
JG Svinos	Successful Application of Microcomputers To ...	Petrole...	1988	
R Soza	Review of Downhole Dynamometer Testing	Permian...	1996	***
SG Gibbs	Predicting the behavior of sucker-rod pumpin...	Journal ...	1963	***
C Guirados, J Erc...	NodalB: A Unique Program for Optimum Prod...	Petrole...	1995	
J DaCunha, S Gibbs	Modeling of a Finite-Length Sucker Rod Using...	SPE An...	2007	
KB Nolen, SG Gibbs	Measurement and Interpretation of Fluid Levels ...	SPE Ann...	1997	
S G GIBBS K B N...	MONITORING AND CONTROLLING ROD PUMPE...	Journal ...	1903	
Y Mo	Design and optimization for sucker rod pump...	SPE/AA...	2000	
SG Gibbs	Design and diagnosis of deviated rod-pumpe...	Journal ...	1992	*
X Jun	Design and analysis of deviated rod-pumped ...	SPE Asi...	2000	
SG Gibbs, AB Neely	Computer diagnosis of down-hole conditions ...	Journal ...	1966	
SG Gibbs	Assumptions of the API rod pumping design ...	Univers...	1994	
George Abdul-M...	Application of artificial neural networks to pu...	Journal ...	1992	
WE Gilbert	An oil-well pump dynagraph	Drilling...	1936	
DJ Schafer, JW Je...	An investigation of analytical and numerical s...	SPE An...	1987	
S Lekia, J Day	An Improved Technique for the Evaluation of ...	SPE Eas...	1988	
Everitt	An Improved Finite-Difference Calculation of ...	Journal ...	2006	
B MA, M Tygel, A...	AUTOMATIC DOWNHOLE CARD GENERATION AN...	SPE Ann...	1996	
A Khodabandeh...	A new approach for modeling fluid inertia effe...	SPE Roc...	1992	
A Khodabandeh ...	A Simple Method for Predicting the Performan...	Journal ...	2010	
J Chacin	A Numerical Approach to the Diagnosis of Suc...	SPE Pro...	1989	
JE Chacin, JC Pur...	A New Model for Studying Oilwell Pumping In...	SPE An...	1987	
I P RYRD W L Beasley	PREDICTING PRIME MOVER REQUIREMENTS POW...	Journal ...	1903	

Predicting the behavior of sucker-rod pumping systems
 SG Gibbs
 Describe un nuevo método para predecir el comportamiento de la sarta de varillas de bombeo, el sistema de bombeo describe un modelo matemático del cual es solucionado con ecuaciones diferenciales parciales con la ayuda de la computadora.
 Journal of Petroleum Technology
 1963 vol. 15 (7) pp. 769-778
 Identificador: 14119701246239852679related:h0jEXH1888Mj
 clave de cita: Gibbs:1963p593
 tipo: Journal Article
 importada: 20 ago 2010 - 16:55
 leída: No leída
 impresa: No impreso
 Google Scholar ID: 14...related:h0jEXH1888Mj | Edición

Fuente. Autores.

4.4 ENTREGABLE 4: DESARROLLO DE SOFTWARE

Durante el desarrollo del seminario de investigación, se estudió detalladamente el diseño del sistema de bombeo mecánico mediante la ecuación de onda y el método predictivo API RP 11L, el desarrollo de los software que simularán estos métodos, se incluyeron como nuevos objetivos del proyecto.

4.4.1 Programa en Matlab de la ecuación de onda.

Figura 10. CD que contiene el programa de la ecuación de onda.

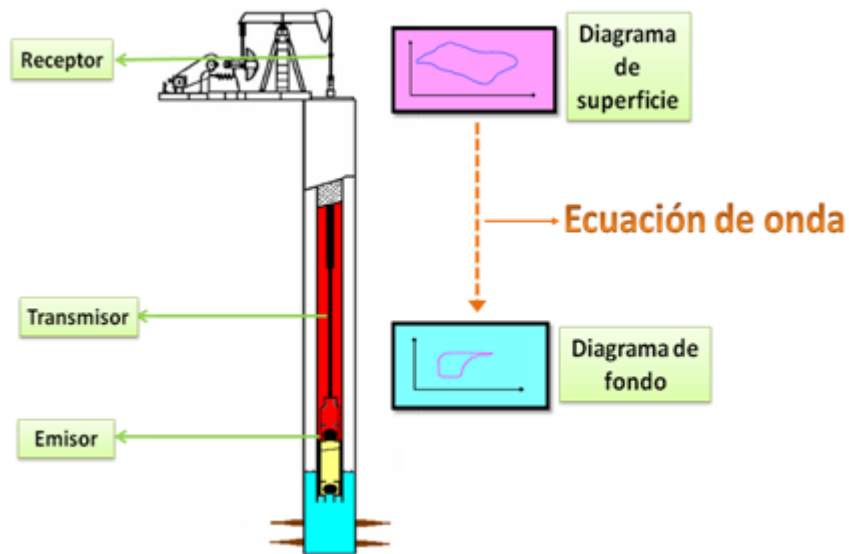


Fuente. Autores.

Para la simulación del modelo matemático del comportamiento dinámico de la sarta de varillas para la obtención de la carta dinamométrica de fondo a partir de la carta dinamométrica de superficie, se usó Matlab como lenguaje de programación.

El programa está disponible en un disco compacto con la carátula estándar del seminario (ver figura 10) y tiene como título “programa ecuación de onda”, dentro del CD se encuentra una carpeta que contiene los archivos necesarios para ejecutar el programa y un manual del usuario que explica detalladamente la forma de uso del programa de la ecuación de onda.

Figura 11. Filtración de la información de la barra pulida para obtener la carta de fondo.



Fuente. THETA ENTERPRISE. Bombeo mecánico optimización. Modificado por los autores.

En el presente análisis, se asume un flujo newtoniano laminar a través del anular comprendido entre la sarta de varillas y la tubería de producción.

La ecuación integro-diferencial parcial que describe el comportamiento dinámico de una sarta de varillas telescópica es la siguiente.

$$\frac{1}{\rho_k} \left[E_k \frac{\partial^2 u_k}{\partial x_k^2}(x_k, t) + \eta_k \frac{\partial^3 u_k}{\partial x_k^2 \partial t}(x_k, t) \right] + g = \frac{\partial^2 u_k}{\partial t^2}(x_k, t) + \beta_k \frac{1}{L_k} \int_0^{L_k} \frac{\delta u_k}{\delta t}(x_k, t) dx_k + \gamma_k Q(t) \quad (1)$$

$$(0 \leq x_k \leq L_k; t > 0)$$

Donde:

$$\beta_k = \frac{2\mu_k}{\rho_k} \left\{ \frac{2r_k^2 (r_a^2 - r_k^2 + 2r_k^2 \ln(R)) - (r_a^2 - r_k^2)^2}{r_k^2 [(r_a^4 - r_k^4) \ln(R) + (r_a^2 - r_k^2)^2]} \right\}$$

$$\gamma_k = \frac{4\mu_k}{\rho_k} \left\{ \frac{r_a^2 - r_k^2 - 2r_k^2 \ln(R)}{\pi r_k^2 [(r_a^4 - r_k^4) \ln(R) + (r_a^2 - r_k^2)^2]} \right\}$$

$$Q(t) = \begin{cases} -\pi (r_p^2 - r_k^2) \frac{\partial u_k}{\partial t}(L_k, t) & \left(\frac{\partial u_k}{\partial t}(L_k, t) \leq 0 \right) \\ \pi r_p^2 \frac{\partial u_k}{\partial t}(L_k, t) & \left(\frac{\partial u_k}{\partial t}(L_k, t) > 0 \right) \end{cases} \quad (2)$$

Donde, el módulo de pérdidas η_k , representa el comportamiento visco elástico de la sarta de varillas de acuerdo al modelo de kelvin-Voight.

En la ecuación (1), el primer y el segundo término representan el comportamiento elástico y visco elástico (en el caso de varillas de fibra de vidrio) y el tercer término describe los efectos gravitacionales. En el miembro de la derecha de la ecuación (1), el primer término corresponde a la inercia de las varillas, el término integral representa la amortiguación de la vibración de las barras, mientras que el término de caudal representa los efectos viscosos de la interacción del fluido-varilla y fluido-tubería de producción. Por otra parte, existe la influencia de la inercia del líquido, que está implícito en el desarrollo de la parte dinámica de los fluidos del problema.

Tabla 5. Nomenclatura para el K-ésimo tramo de varilla simple.

NOMENCLATURA PARA EL K-ÉSIMO TRAMO DE VARILLA	
L_k	Longitud del tramo
r_k	Radio de sección transversal del tramo
E_k	Módulo de Elasticidad del material del tramo
η_k	Módulo de pérdida del material del tramo (amortiguamiento interno)
μ_k	Viscosidad dinámica del fluido bombeado en el k-ésimo tramo
ρ_k	Densidad del material de la barra del k-ésimo tramo
x_k	Coordenada de dirección longitudinal
t	Coordenada temporal
r	Coordenada de dirección radial
$u_k(x_k, t)$	Desplazamiento longitudinal en relación a la posición de equilibrio
r_a	Radio interno de tubería de producción
ρ_f	Masa específica del fluido bombeado
r_p	Radio del pistón de la bomba

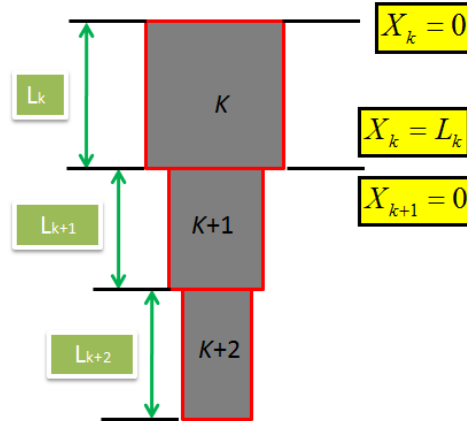
Si se aplica el principio de continuidad en un punto de conexión de dos segmentos de sarta de varillas, los desplazamientos y las fuerzas actuantes en cada varilla son iguales. Por lo tanto, las condiciones de frontera para una sarta de varillas combinada, usando una descripción discreta para los extremos k y $k+1$ de cada tramo de varillas, pueden ser escritas de la siguiente manera:

$$u_k(L_k, t) = u_{k+1}(0, t) \quad (3)$$

$$A_k \left(E_k \frac{\partial u_k}{\partial x_k}(L_k, t) + \eta_k \frac{\partial^2 u_k}{\partial x_k \partial t}(L_k, t) \right) = A_{k+1} \left(E_{k+1} \frac{\partial u_{k+1}}{\partial x_{k+1}}(0, t) + \eta_{k+1} \frac{\partial^2 u_{k+1}}{\partial x_{k+1} \partial t}(0, t) \right) \quad (4)$$

$(k = 1, 2, 3, \dots, n-1)$

Figura 12. Sarta de varillas combinada. Coordenadas de posición axial y desplazamiento.



Fuente. Autores

Las condiciones de frontera en la superficie ($X_1=0$), en la conexión entre la sarta de varillas y la barra pulida, están dadas por:

$$p(t) = -u_1(0, t) \quad (5)$$

$$f(t) = A_1 \left(E_1 \frac{\partial u_1}{\partial x_1}(0, t) + \eta_1 \frac{\partial^2 u_1}{\partial x_1 \partial t}(0, t) \right) \quad (6)$$

La gráfica del desplazamiento $p(t)$ y la fuerza $f(t)$ corresponde a la carta dinamométrica de superficie, y estas variables son medidas en campo. Basados en las condiciones de frontera (3) y (4) junto con los registros tomados en campo (5) y (6), se puede determinar la solución de la ecuación (1), se puede evaluar la solución armónica para cualquier punto a lo largo de la sarta de varillas para una frecuencia ω impuesta por el sistema.

Usando una expansión en series de Fourier, la solución analítica obtenida es la siguiente.

$$u_k(x_k, t) = \frac{\rho_k}{2E_k} \left[-g + \gamma_k \frac{Q_0}{2} \right] x_k^2 + \gamma_k \sum_{v=1}^n \left[\left(\frac{\omega^2 v^2 Q_v + \beta_k \omega v R_v}{\omega^4 v^4 + \beta_k^2 \omega^2 v^2} \right) \cos v\omega t + \left(\frac{\omega^2 v^2 R_v + \beta_k \omega v Q_v}{\omega^4 v^4 + \beta_k^2 \omega^2 v^2} \right) \sin v\omega t \right] + \frac{A_{k0}}{2} + \frac{B_{k0}}{2} x_k + \sum_{v=1}^n \left[a_{kv}(x_k) \cos v\omega t + b_{kv}(x_k) \sin v\omega t \right]$$

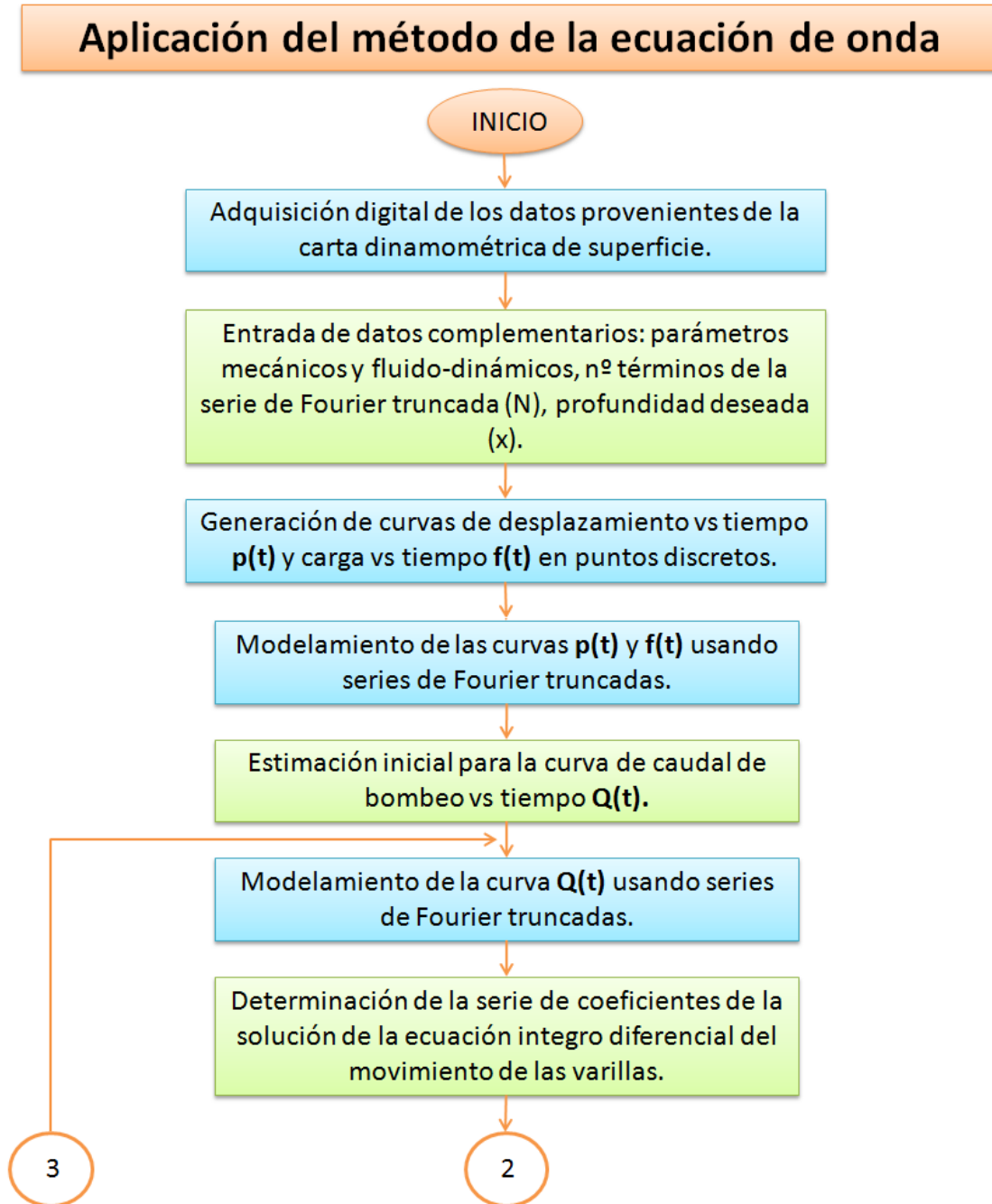
Con A_{k0}, B_{k0} constantes arbitrarias, $\{Q_v\}_{v=0}^n \cdot \{R_v\}_{v=1}^n$ son los coeficientes de la serie de Fourier que modela el caudal $Q(t)$. $\{a_{kv}(x_k)\}_{v=1}^n \cdot \{b_{kv}(x_k)\}_{v=1}^n$ Son parámetros constantes calculados al resolver la ecuación integro-diferencial de onda para una profundidad dada.

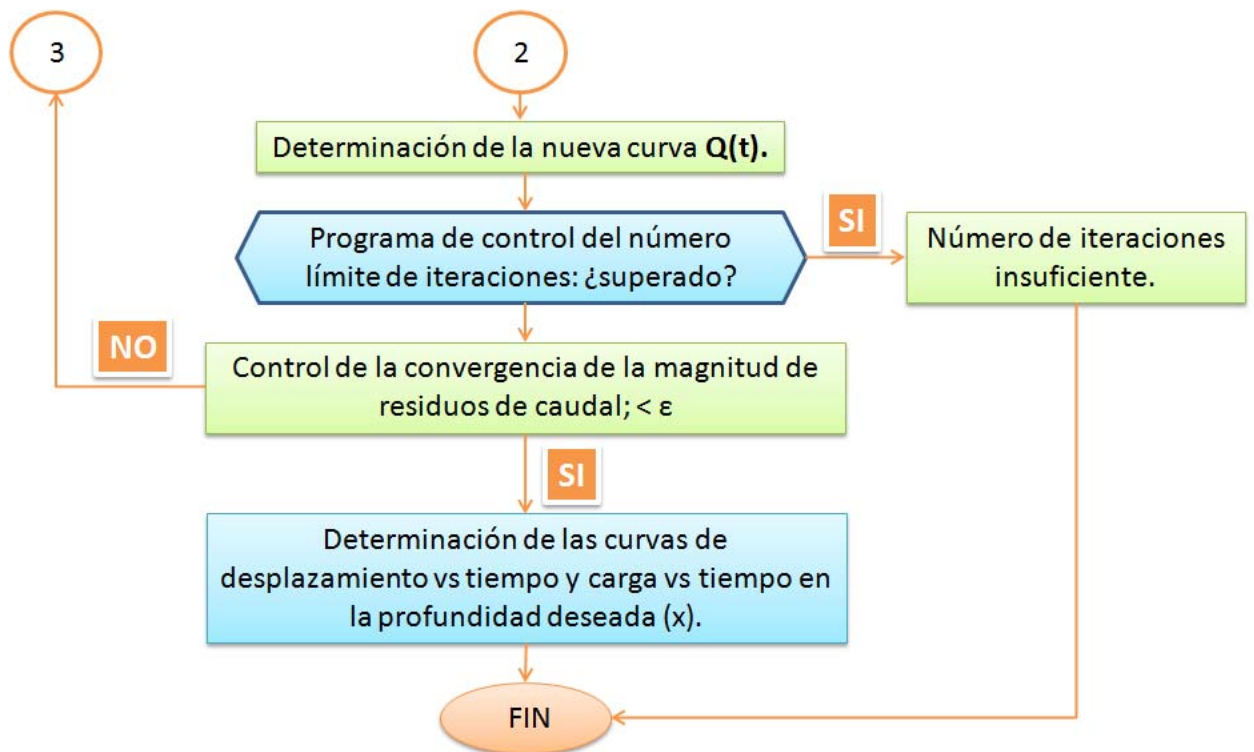
Como la evolución temporal del flujo volumétrico $Q(t)$ (Ec. 2) es desconocida en la práctica, es necesario un proceso iterativo de cálculo de la solución, porque la función $u_n(x_n, t)$ depende del caudal y este depende del valor de $\frac{\partial u_n}{\partial x_t}(L_n, t)$.

4.4.1.1 Diagrama de flujo para la simulación del método matemático propuesto.

El diagrama de flujo presentado a continuación muestra los principales pasos a seguir para obtener la carta dinamométrica de fondo utilizando el modelo matemático propuesto.

Figura 13. Diagrama de flujo para la simulación del método matemático propuesto.





Fuente. Manuel de Almeida Barreto Filho. *Geração de carta dinamométrica de fundo para diagnóstico do bombeio mecânico em poços de petróleo*. Universidade Estadual de Campinas. Modificada por los autores.

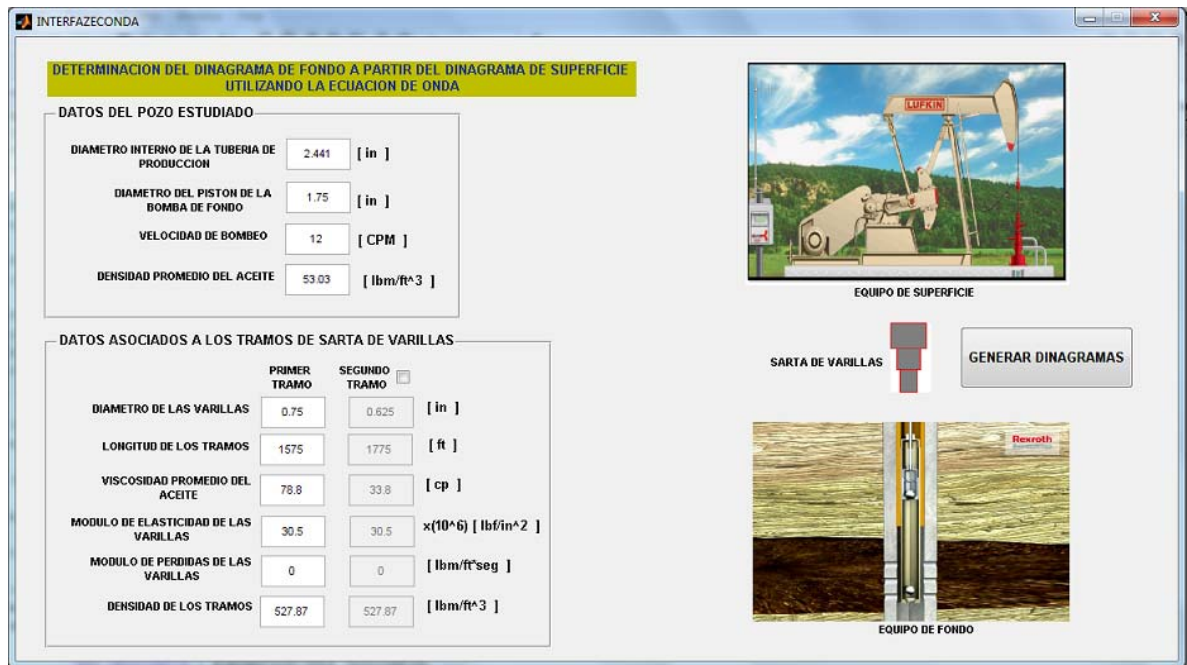
Presentación del programa para la determinación del dinagrama de fondo a partir del dinagrama de superficie utilizando la ecuación de onda.

Se desarrolló un programa en el software matemático “Matlab”, que predice el comportamiento dinámico (carga y posición) de la sarta de varillas en un punto de la misma ubicado a la profundidad de asentamiento de la bomba, es decir, en el extremo inferior del último tramo de sarta de varillas. Este programa está basado en el modelo matemático y el diagrama de flujo descritos anteriormente.

El programa fue diseñado para simular sistemas de bombeo mecánico con sartas de hasta dos secciones o tramos de varillas.

Al ejecutar el programa, se despliega la siguiente interfaz gráfica que se muestra en la *figura 14*.

Figura 14. Interfaz gráfica de la aplicación del método de la ecuación de onda.



Fuente. Autores.

El programa requiere que el usuario ingrese varios datos, los cuales están agrupados en dos categorías: “DATOS DEL POZO ESTUDIADO” y “DATOS ASOCIADOS A LOS TRAMOS DE LA SARTA DE VARILLAS”.

Tabla 6. Datos del pozo estudiado.

Datos del pozo estudiado	Unidades
DIÁMETRO INTERNO TUBERÍA DE PRODUCCIÓN	Pulgadas
DIÁMETRO DEL PISTÓN DE LA BOMBA DE FONDO	Pulgadas
VELOCIDAD DE BOMBEO	Ciclos por minuto
DENSIDAD DEL ACEITE BOMBEADO	Libra-masa por pie cúbico

Fuente. Autores.

Hay que recordar que un ciclo se lleva a cabo cuando la barra pulida recobra su posición original después de realizar una carrera descendente y una carrera ascendente.

El programa permite simular sartas que tengan hasta dos tipos de varillas. Cada conjunto de varillas que tengan las mismas características corresponden a un tramo de la sarta. De esta manera, si se dispone de una sarta con dos tramos, cada tramo tendrá asociado cada una de las siguientes propiedades.

Tabla 7. Datos asociados a los tramos de la sarta de varillas.

Datos asociados a los tramos de la sarta	Unidades
DIÁMETRO DE LAS VARILLAS	Pulgadas
LONGITUD DE LOS TRAMOS	Pies
VISCOSIDAD PROMEDIO DEL ACEITE	Centipoise
MODULO DE ELASTICIDAD DE LAS VARILLAS	Libra-fuerza por pulgada cuadrada
MODULO DE PÉRDIDAS DE LAS VARILLAS	Libra-masa por pie-segundo
DENSIDAD DE LAS VARILLAS	Libra-masa por pie cúbico

Fuente. Autores.

Debido a la variación de las propiedades termodinámicas a lo largo de la tubería de producción (desde el fondo hasta la superficie), debe hacerse un estimativo de la viscosidad promedio del aceite bombeado en cada tramo de sarta de varillas.

En el caso de las varillas metálicas, use un módulo de pérdidas igual a cero.

Si se pretende simular una sarta que cuenta con dos tramos de varillas, Se debe activar el cuadro de chequeo de los datos para el segundo tramo de sarta, de lo contrario debe mantenerse inactivo.

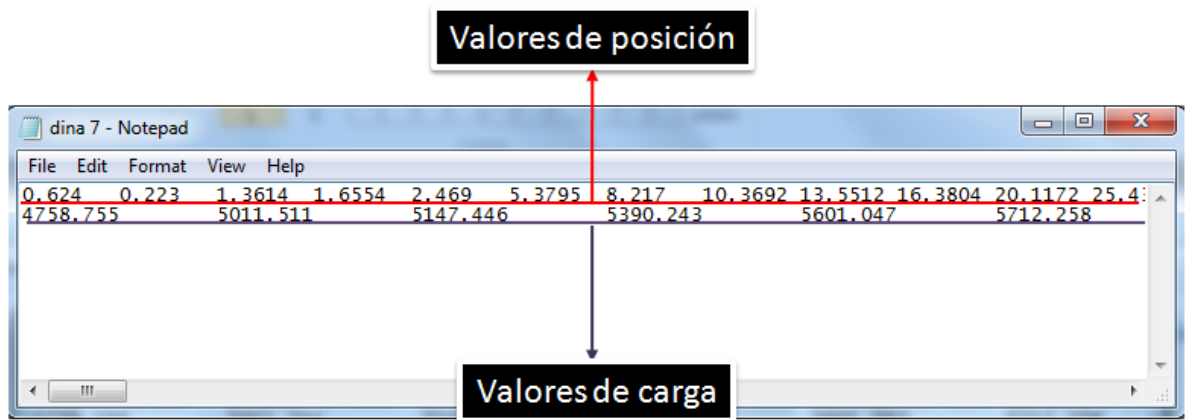
El primer tramo de varillas es el más superficial y el segundo el más profundo.

4.4.1.2 Generar diagramas.

Antes de aplicar la función “GENERAR DINAGRAMAS”, debe contar con un bloc de notas en donde se consignen los valores medidos en superficie de carga y posición (valores discretos medidos durante un ciclo de bombeo).

Los valores de posición deben ir en el primer renglón (fila) del bloc de notas y los valores de carga en el segundo renglón. Recuerde que las unidades de posición y carga son pulgadas y libras-fuerza respectivamente.

Figura 15. Bloc de notas con los valores medidos de posición y carga.

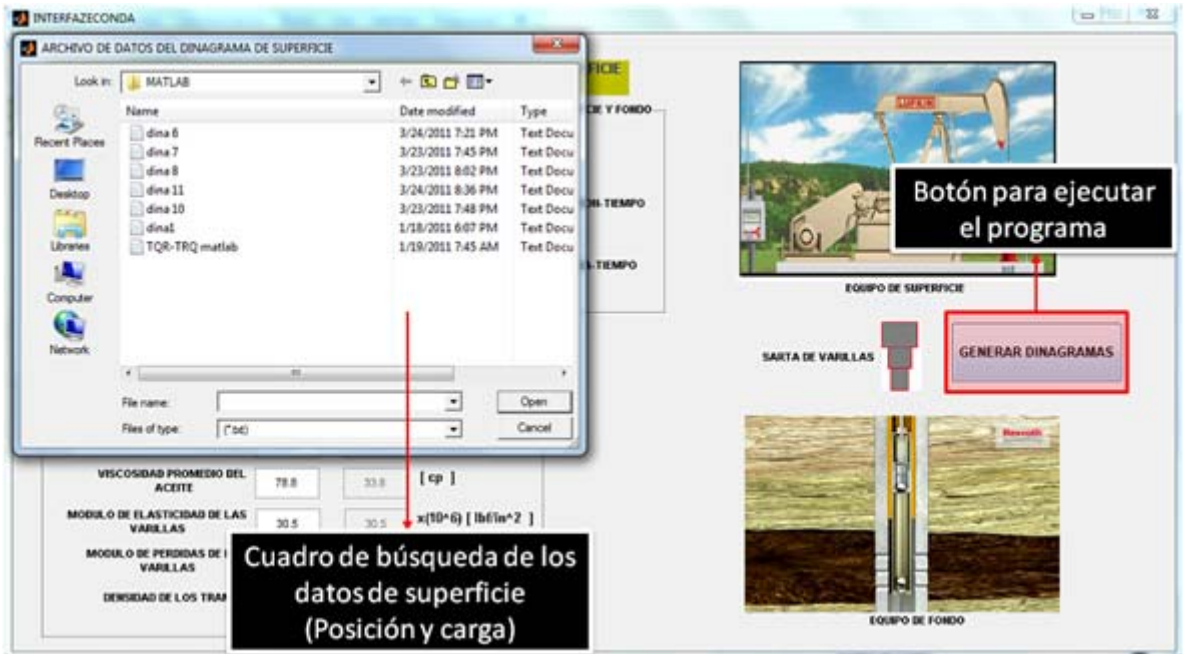


Fuente. Autores.

Al hacer clic en el botón “GENERAR DINAGRAMAS” se despliega un cuadro de diálogo que solicita la búsqueda del bloc de notas donde se encuentran consignados los valores de posición y carga.

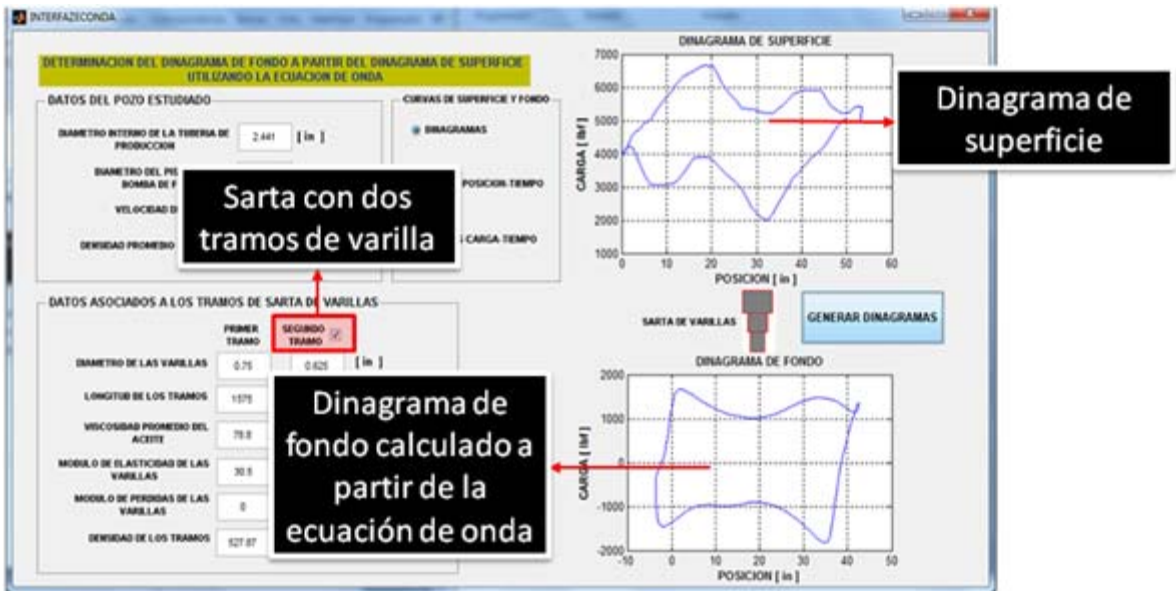
Se debe buscar este bloc en el directorio donde se encuentre almacenado en el ordenador.

Figura 16. Cuadro de diálogo que solicita la búsqueda del bloc de notas.



Fuente. Autores.

Figura 17. Dinagrama de superficie y de fondo calculado a partir del método de ecuación de onda.

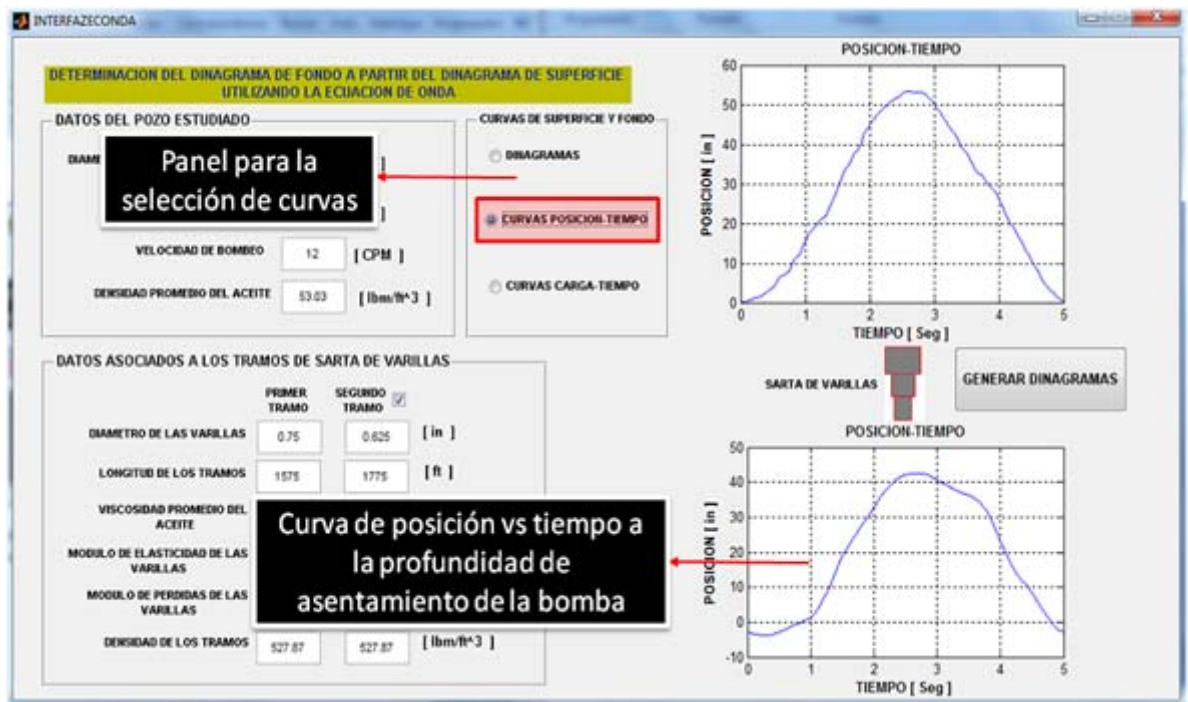


Fuente. Autores.

Una vez haya cargado el archivo de texto con los datos de posición y carga en superficie, el programa calculará los valores respectivos de posición y carga a la profundidad de asentamiento de la bomba, mostrando gráficamente la carta dinamométrica de fondo, como se ve en la *figura 18*.

También es posible observar la evolución temporal de la posición y la carga en la superficie y en el fondo seleccionando cualquiera de las opciones mostradas en el panel “CURVAS DE SUPERFICIE Y FONDO”.

Figura 18. Diagrama de posición vs tiempo a la profundidad de asentamiento de la bomba.



Fuente. Autores.

4.4.2 Programa en Matlab del Método API RP11L

Recommended Practice for Design Calculations for Sucker-Rod Pumping Systems (Conventional Units)

Figura 19. Presentación del CD del Programa del Método API RP11L.



Fuente. Autores.

Se elaboró un programa con ayuda del software matemático Matlab, el cual desarrolla el método predictivo API RP11L. Este programa está disponible en un disco compacto, con la carátula estándar del seminario, y tiene como título “Programa del método API RP11L”. El CD contiene una carpeta que contiene los archivos necesarios para ejecutar el programa, además se encuentra en formato.pdf un manual del usuario, que sirve de guía para cualquier persona que desee hacer uso de este software.

4.4.2.1. Desarrollo del método API RP11L¹⁶. La base del método API consiste en la similitud en la forma de las cartas dinagráficas y los factores adimensionales de velocidad (N/No) y estiramiento de la sarta de varillas (Fo/SKr). Los datos obtenidos de estas cartas dinagráficas calculadas fueron utilizadas por

¹⁶ API RP11L “Recommended Practice for Design Calculations for Sucker-Rod Pumping Systems”.

la API para desarrollar curvas adimensionales y presentadas en forma gráficas, los cuales pueden ser extrapolados a una gran variedad de pozos con diferentes profundidades, diámetro de bomba, velocidades de bombeo y diseño de sarta de varillas (*Figura 20*). Las tablas elaboradas del método hacen más fácil la selección y evaluación de equipos de bombeo, sin necesidad de cálculos excesivos.

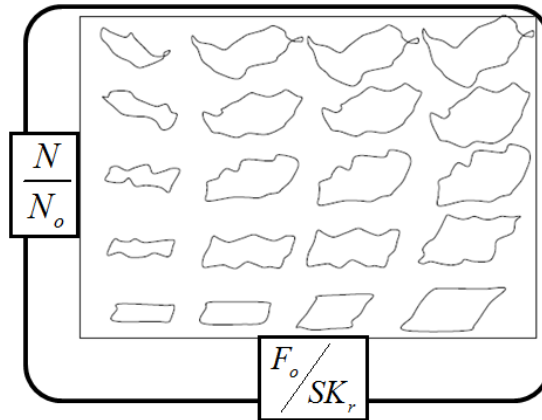
En el trabajo de investigación se asumió la tubería anclada en la bomba. No puede usarse para sarta de varillas de fibra de vidrio, sistemas con golpe de fluido o interferencia por gas, unidades de bombeo con geometrías especiales y motores con alto deslizamiento; solo calcula el efecto de contrabalance para condiciones de balance, no puede usarse para estimar el efecto de una unidad fuera de balance. Este método tiene muchas limitaciones debido a las suposiciones realizadas cuando fue desarrollado.

Estas simulaciones se hicieron bajo las siguientes consideraciones:

- Llenado completo de la bomba, 100% líquido.
- Sarta de varillas de acero API.
- Unidades de bombeo de geometría convencional.
- Poco deslizamiento del motor.
- Unidad perfectamente balanceada.
- Pocos efectos de fricción o aceleración del fluido.
- Tubería de producción (*tubing*) anclada.
- Profundidades mayores a 2000 pies.

Para evitar las limitaciones, se utilizan modernas técnicas de diseño que pueden simular y pronosticar el comportamiento del sistema de bombeo con exactitud; tal como la *ecuación de onda* desarrollado por *Sam Gibbs*, la cual es un modelo matemático para simular el comportamiento de la sarta de varillas y calcular la carta dinográfica de fondo a partir de la carta dinográfica de superficie siendo esta una aplicación de análisis diagnóstico.

Figura 20. Similitud de Cartas Dinagráficas en función de los parámetros adimensionales (API RP11L)



Fuente. PDVSA CIED. Diseño de Instalaciones de Levantamiento Artificial por Bombeo Mecánico.

4.4.2.2. Nomenclatura del método API RP11L¹⁷

- Sp** - Carrera de la bomba en fondo de pozo, (in)
- PD**- Desplazamiento de la bomba, (Bpd - barriles por día)
- PPRL**- Carga máxima en la barra pulida, (Lb)
- MPRL**- Carga mínima en la barra pulida, (Lb)
- PT**- Torque máximo de la manivela, (Lb*in)
- PRHP**- Potencia para elevar la barra pulida (Hp)
- CBE**- Contrapeso necesario, (Lb)
- H**- Elevación neta - Nivel de líquido, (Ft)
- L**- Profundidad de la bomba, (Ft)
- N**- Velocidad de bombeo, (SPM - *stroke per minute*)
- S**- Carrera de la barra pulida, (in)
- D**-Diámetro del émbolo, (in)
- G**- Gravedad específica del líquido producido

¹⁷ API RP11L - Recommended Practice for Design Calculations for Sucker-Rod Pumping Systems.

Wr- Peso medio unitario de la sarta de varillas en el aire, (Lb*ft) (Tabla 4.1 columna 3)¹⁸

Er- constante elástica de la sarta de varillas, (in / Lb*ft) (Tabla 4.1, columna 4)

Nota: Er representa las pulgadas de elongación causada por la aplicación de una carga de una libra a una varilla de un pie de largo.

Fc- Factor de ajuste de la frecuencia natural. (Tabla 4.1, columna 5)

Fo- Carga de fluido diferencial en el total de área del émbolo, (Lb)

1/kr- Constante elástica del total de sarta de varillas, (in/Lb)

Nota: kr = constante elástica del total de la sarta de varillas y representa la carga en libras requerida para estirar el total de la sarta de varillas en una pulgada.

SKr- Libras de carga necesaria para estirar el total de la sarta de varillas una cantidad igual a la carrera S de la barra pulida.

No- Frecuencia Natural de la sarta de varillas de un solo diámetro, (SPM).

No´- Frecuencia Natural de la sarta de varillas con diferente secciones de diámetro, (SPM).

W - Peso total de la sarta de varillas en el aire, (Lb).

Wrf – Peso total de la sarta de varillas en el fluido, (Lb).

F1-Factor de PPRL. Carga de fluido más los efectos dinámicos máximos en la carrera ascendente.

F2-Factor de MPRL. Efectos dinámicos en la carrera descendente menos la carga en la barra pulida.

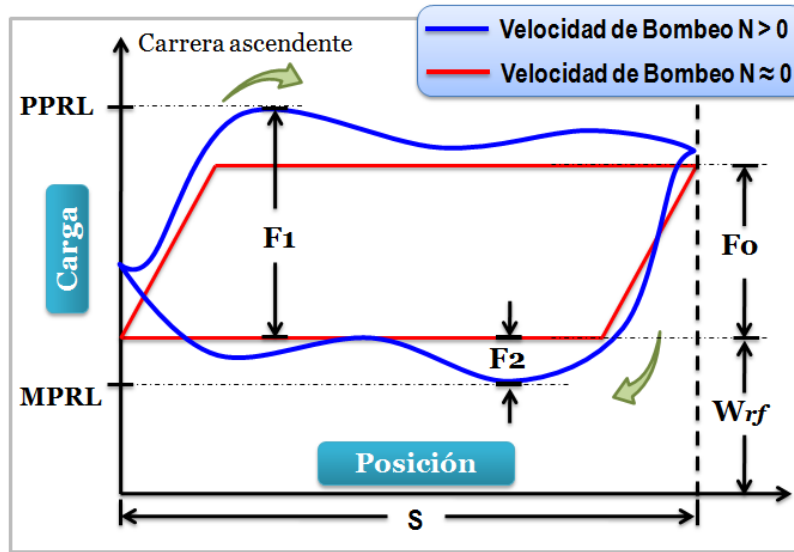
T- Torque de la manivela, (Lb*in).

F3 - Factor PRHP.

4.4.2.3. Procedimiento de cálculo. Los parámetros de interés del método API RP11L son mostrados en la *figura 21*.

¹⁸ Estas tablas corresponden a las del documento API RP 11L.

Figura 21. Carta dinagráfica básica.



Fuente. API RP 11L. Modificada por los autores.

- a) Si $N \cong 0$
- $$PPRL = W_{rf} + F_o$$
- $$MPRL = W_{rf}$$
- b) Si $N > 0$
- $$PPRL = W_{rf} + F_1$$
- $$MPRL = W_{rf} - F_2$$

El problema es generalizado por el uso de parámetros de variables adimensionales independientes (N/N_o) y (F_o/SK_r), con estas dos variables y utilizando las figuras de la 4.1 a la 4.6 del documento API RP 11L se calculan las variables adimensionales dependientes, con las cuales se obtienen los parámetros de interés.

4.4.2.4. Variables adimensionales independientes:

Velocidad de Bombeo: $\boxed{\frac{N}{N_o}}$ (SPM / SPM = 1)

Estiramiento de la sarta de varillas: $\boxed{\frac{F_o}{SK_r}}$ $\left(\frac{Lb}{in \cdot \left[\frac{Lb}{in} \right]} = 1 \right)$

N/N_o : Relación de velocidad de bombeo a la frecuencia natural de la sarta de varillas de un solo diámetro.

N/N_o ,: Relación de velocidad de bombeo a la frecuencia natural de la sarta de varillas combinada (diferente secciones de diámetro “ahusada”).

4.4.2.5. Variables adimensionales dependientes:

Carrera del embolo S_p , $\boxed{S_p/S}$

Carga máxima de la barra pulida PPRL, $\boxed{F_1/SK_r}$

Carga mínima de la barra pulida MPRL, $\boxed{F_2/SK_r}$

Torque máximo PT, $\boxed{2T/S^2K_r}$

HP de la barra pulida PRHP, $\boxed{F_3/SK_r}$

4.4.2.6. Cálculo de los parámetros de interés:

Carrera de la bomba: $\boxed{S_p = \left(\frac{S_p}{S} \right) \cdot S}$

Desplazamiento del pistón (Bpd): $\boxed{PD = 0.1166 \cdot S_p \cdot N \cdot D^2}$

Carga máxima en la barra pulida (Lb): $\boxed{PPRL = W_{rf} + \left[\left(\frac{F_1}{SK_r} \right) \cdot SK_r \right]}$

Carga mínima en la barra pulida (Lb): $\boxed{PPRL = W_{rf} - \left[\left(\frac{F_2}{SK_r} \right) \cdot SK_r \right]}$

Torque máximo manivela (Lb*in): $\boxed{PT = \left(\frac{2T}{S^2K_r} \right) \cdot SK_r \cdot S/2 \cdot T_o}$

Potencia para elevar la barra pulida (Hp):
$$PRHP = \left(\frac{F_3}{SK_r} \right) \cdot SK_r \cdot S \cdot N \cdot 2.53 \cdot 10^{-6}$$

Potencia para elevar la barra pulida (Hp):
$$PRHP = \left(\frac{F_3}{SK_r} \right) \cdot SK_r \cdot S \cdot N \cdot 2.53 \cdot 10^{-6}$$

Efecto Contrabalance (Lb):
$$CBE = 1.06 \left(W_{rf} + \frac{1}{2} F_o \right)$$

4.4.2.7. Procedimiento del diseño. En general, se requieren tres pasos en el diseño de una instalación:

- Selección preliminar de los componentes de la instalación.
- Las características de funcionamiento de la selección preliminar, se calculan mediante el uso de las fórmulas, tablas y cifras que se presentan en el documento API RP11L.
- El desplazamiento de la bomba y las cargas se calculan en comparación con los volúmenes, capacidades de carga, tensiones, y otras limitaciones de la selección preliminar.

La cantidad mínima de información que debe ser conocida (o supuesta) de la unidad de bombeo mecánico para el cálculo del diseño incluye:

- Nivel de líquido – **H**, elevación neta (pies)
- Profundidad de la bomba – **L** (pies)
- Velocidad de bombeo – **N** (spm: *stroke per minute*)
- Longitud de carrera superficie – **S** (pulgadas)
- Diámetro del émbolo de la bomba – **D** (pulgadas)
- Peso específico del líquido – **G**
- Diámetro de la tubería de producción.
- Diseño de la sarta de varillas (N° de varilla).

Con estos factores, el programa calcula:

- Carrera del pistón– **Sp** (pulgadas)
- Desplazamiento de la bomba – **PD**, (Bpd: barriles por día)
- Carga máxima barra pulida – **PPRL** (Lb)
- Carga mínima barra pulida – **MPRL** (Lb)
- Torque máximo – **PT** (Lb*pulg)
- Caballos de fuerza para elevar la barra Pulida – **PRHP** (Hp)
- Contrapeso requerido – **CBE** (Lb)

Si el cálculo del desplazamiento de la bomba no satisface los requisitos de conocimiento previo, los ajustes necesarios se deben hacer en los datos asumidos. El valor de la tasa de producción óptima se puede adquirir, realizando un análisis nodal en el fondo del pozo, obteniendo el punto de corte entre las curvas de inflow y outflow, para obtener la curva inflow se puede utilizar el método del índice de productividad IP o el método de Vogel's según el caso.

4.4.2.8. Presentación del programa desarrollado en Matlab del método API RP 11L. El método de diseño es descrito en el documento API RP11L, el cual contiene un formato (ver anexo Figura 4. Example Design Calculations Conventional Sucker Rod Pumping System) donde se explica cómo efectuar los cálculos de diseño.

El programa desarrollado tiene como objetivo evitar los cálculos manuales del documento API RP 11L, de este modo el usuario solo debe ingresar los datos conocidos o supuestos H , L , N , S , N° de varilla, D_{bomba} , G y D_{tubing} y el programa hará los cálculos y entregará como resultado W , F_o , S_p , P_D , W_{rf} , el diseño de la sarta de varillas, F_o/SK_r , N/No' , $PPRL$, $MPRL$, PT , $PRHP$ y CBE .

Según la tabla 4.1 del documento API RP 11L podemos utilizar diferentes diámetros de la bomba para un mismo N° de varilla; el programa permite escoger

todas las posibilidades de N° de varilla y según la que se escoja permitirá seleccionar los posibles diámetros de la bomba según el N° de varilla, después de haber realizado este procedimiento e ingresar todos los datos requeridos se activará el botón “ejecutar”.

El código del programa contiene la tabla 4.1 del documento API y de ella leerá W_r , E_r , F_c y el diseño de la sarta de varillas.

A partir de los datos conocidos o supuestos y los obtenidos de la tabla 4.1 se calculan las siguientes variables:

Fo - Carga de fluido sobre la bomba: $F_o = 0.34 \cdot G \cdot D^2 \cdot H$

Kr - Constante elástica del total de sarta de varillas: $\frac{1}{K_r} = E_r \cdot L$

Con ellas calcula las variables adimensionales independientes Fo/SKr y N/No:

$\frac{F_o}{SK_r}$: Estiramiento de sarta de varillas adimensional. Esto significa que de la longitud total de la sarta de varillas se estirarán el $(F_o/SK_r \cdot 100)$ % de la carrera de superficie S, cuando levanta la carga de fluido Fo.

$\frac{N}{N_o'} = \frac{NL}{245000F_c}$: Velocidad de bombeo adimensional.

Este parámetro es la relación entre la frecuencia forzada N (velocidad de bombeo) y la frecuencia natural no amortiguada de la sarta de varillas (sarta de varillas de un solo diámetro “No”, sarta de varillas con diferentes secciones de diámetro No’), la cual es la frecuencia mediante la cual, la sarta de varillas vibrará sin fricción si estuviera fija en tope y libre en el fondo.

Además de las cargas a las que está sujeta la sarta existen las provenientes de las vibraciones. Si es aplicada una fuerza a una barra, con un extremo fijo, se

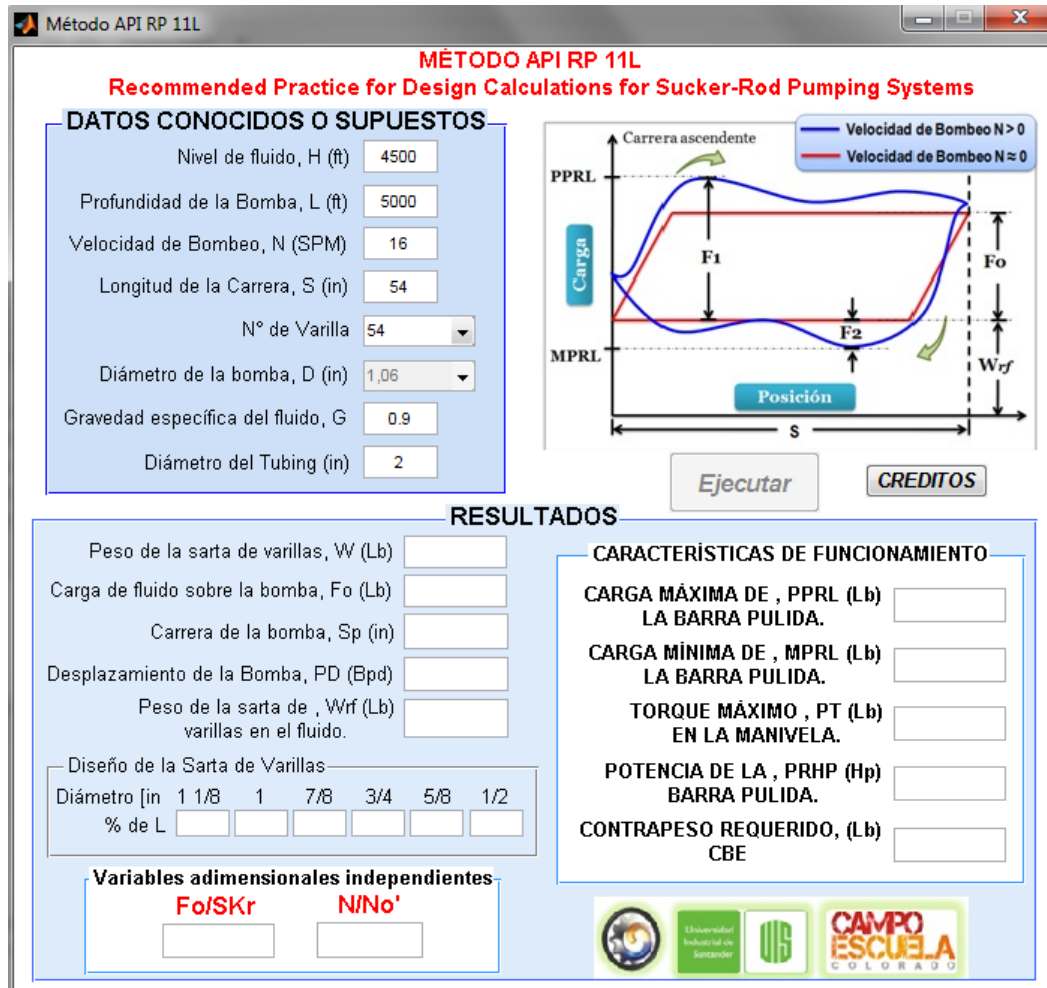
formará una onda que transmitirá la fuerza y recorrerá la barra en forma de onda longitudinal. La velocidad de la onda será igual a la velocidad del sonido en el material de la barra. En el otro extremo de la barra la onda será reflejada y volverá al punto de origen. Si es aplicado otro impulso a la barra de acero vibrando, la interferencia de las ondas puede ser constructiva o destructiva, considerando el caso extremo si un sistema está vibrando con cierta frecuencia y amplitud, y otra vibración de la misma frecuencia y amplitud es producida en concordancia con la primera, la vibración resultante tendrá una amplitud igual al doble de la vibración original.

El comportamiento de la sarta de varillas se puede considerar como un sistema masa resorte el cual tiene un movimiento Armónico Simple (M.A.S). La frecuencia natural no amortiguada se muestra en la teoría de la vibración a ser inversamente proporcional al tiempo requerido para que una onda de fuerza para hacer cuatro recorridos a lo largo de la varilla de bombeo.

Fc (factor de frecuencia) es una constante de proporcionalidad que depende del diseño de la barra. Para la sarta de varillas de un solo diámetro, Fc=1. La frecuencia natural de una sarta de varillas con diferentes secciones de diámetro es mayor que el de sarta de un solo diámetro de igual longitud. Por lo tanto, para la sarta con diferentes secciones, Fc >1.

Utilizando las figuras 4.1- 4.6 del documento API RP11L el código ingresa las variables adimensionales independientes Fo/SKr y N/No' para obtener las variables adimensionales dependientes S_p/S , F_1/SK_r , F_2/SK_r , $2T/S^2K_r$, F_3/SK_r ; y con ellas calcula las variables de interés.

Figura 22. Interfaz del programa del método API RP 11L.



Fuente. Autores

Para ejecutar el programa, el usuario primero debe llenar las casillas de la sección “datos conocidos o supuestos”, algunos de estos datos son ingresados usando el teclado del PC, pero los datos que están estandarizados como diámetro de la bomba y N° de varilla, se deben seleccionar desplegando las opciones que da el programa haciendo clic en la flecha, como se muestra en la figura 23.

La figura 24, muestra los resultados obtenidos, después de ejecutar el programa correctamente. Los datos arrojados por el programa del método API RP 11L, son los parámetros de interés para el diseño del sistema de bombeo mecánico.

Figura 23. Selección de parámetros estándar.

Left Screenshot Parameters:

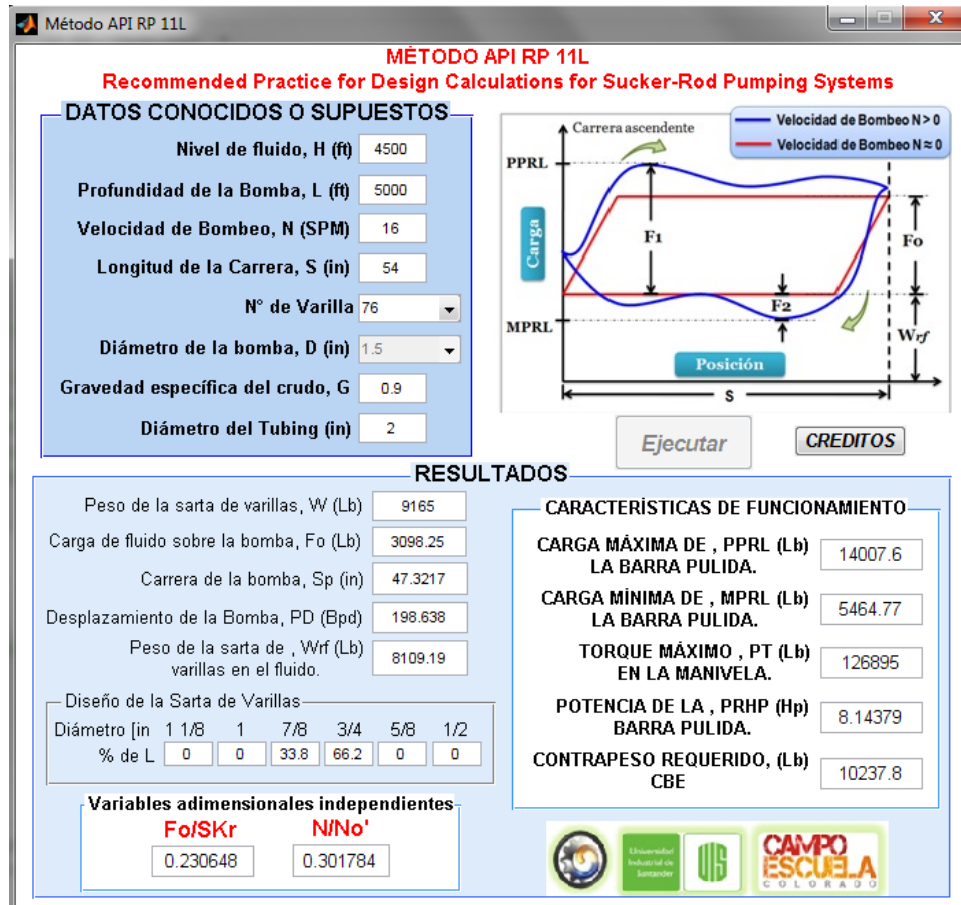
- N° de Varilla: 54
- Diámetro de la bomba, D (in): 54
- Gravedad específica del fluido, G: 65
- Diámetro del Tubing (in): 76
- Peso de la sarta de varillas, W: 96
- Carga de fluido sobre la bomba, Fo: 97
- Carrera de la bomba, Sp: 107
- Desplazamiento de la Bomba, PD (Bpd): 108

Right Screenshot Parameters:

- N° de Varilla: 76
- Diámetro de la bomba, D (in): 1.06
- Gravedad específica del fluido, G: 1.25
- Diámetro del Tubing (in): 1.5
- Peso de la sarta de varillas, W: 2.5
- Carga de fluido sobre la bomba, Fo: 3.25
- Carrera de la bomba, Sp: 3.75

Fuente. Autores.

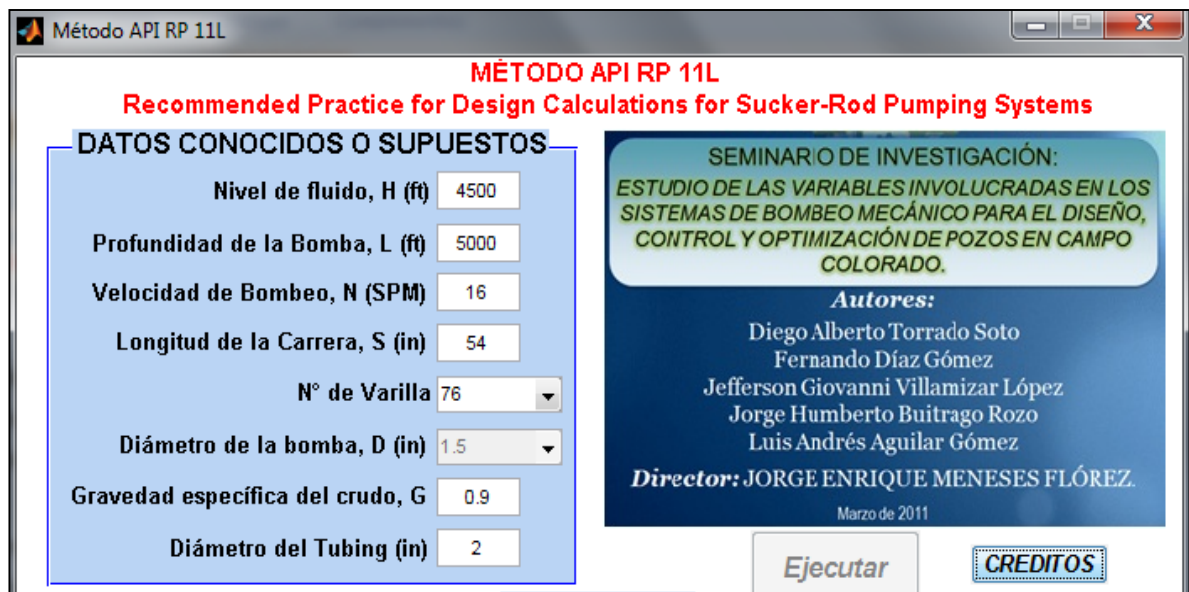
Figura 24. Resultados arrojados por el programa del método API RP 11L.



Fuente. Autores.

El usuario al hacer clic en el botón créditos, automáticamente reemplaza la imagen de carta dinagráfica básica por una imagen que muestra el título del seminario de investigación, los autores del programa del método predictivo API RP11L, el director del proyecto y la fecha en que se realizó dicho programa. Como se ve en la siguiente figura.

Figura 25. Créditos del programa del método API RP11L.



Fuente. Autores.

Si la MPRL es negativa, se requiere diferentes consideraciones de diseño; por ejemplo, una velocidad de bombeo más baja. El rango entre las cargas máximas y mínimas en la barra pulida, gobiernan los límites de esfuerzos impuestos sobre la sarta de varillas, y son factores claves en la fatiga y vida útil de la misma. Con el valor PT podemos determinar el tamaño de la caja de engranajes. Una forma aproximada de determinar la potencia del motor es multiplicar el valor PRHP por dos.

El valor de contrabalance efectivo en la barra pulida debe balancear la unidad, de tal manera que, el torque máximo en la carrera ascendente sea igual al de la carrera descendente. Una vez conocido el máximo momento de contrabalanceo (M) pueden utilizarse los gráficos o tablas de los fabricantes de unidades para

decidir hacia donde mover las pesas y lograr un balance adecuado de la unidad. Con los valores calculados podemos Seleccionar el tipo de unidad según los catálogos como por ejemplo el catálogo LUFKIN.

Un catálogo de más de 1100 cartas dinamométricas derivadas de una computadora electrónica analógica para muchas combinaciones de los parámetros independientes adimensional F_0/Skr y N/No se publicó con el nombre de API BULL 11L2, *Catalog of Analog Computer Dynamometer Cards*.

Dos programas de computadora se han desarrollado a partir de los datos de la API RP11L. Un programa contiene las tabulaciones de los cálculos realizados para profundidades de 2000 a 12.000 pies en incrementos de 500 pies y para tasas de producción de 100 bpd a más de 1500 bpd en distintos incrementos. Este material se publicó con el nombre de API BULL 11L3, *Sucker Rod Pumping System Design Book*.

El otro programa desarrolló una serie de curvas para la selección de la viga de unidades de bombeo para profundidades de 1600 pies a 9900 pies y diferentes tasas de producción, combinaciones de tamaños de varillas, tamaños de la bomba y velocidades. Este material se publicó con el nombre de API BULL 11L4, *Curves for Selecting Beam Pumping Units*.

Es necesario comparar estas cargas calculadas con las limitaciones impuestas por la selección preliminar. Se calcula la tensión en las varillas de bombeo para determinar si está dentro de límites aceptables. Los cálculos que involucra el método API no son complicados, pero se consume mucho tiempo en su utilización. En tal sentido, se programaron varios casos, parecidos al efectuado, utilizando el computador y se generaron alrededor de 60 mil casos predictivos, con una gran variedad de combinaciones de equipos, profundidades y tasas de producción. Esta información está tabulada en el boletín API BULL 11L3, éste compendio hace el diseño de una instalación de bombeo mecánico, mucho más fácil y elimina el tedioso tiempo de cálculo.

4.5 ENTREGABLE 5: TRADUCCIÓN TESIS DEL PORTUGUÉS AL ESPAÑOL

Figura 26. CD que contiene la traducción del portugués al español de la tesis de Manuel de Almeida Barreto Filho.



Fuente. Autores.

La tesis titulada “Generación de las cartas dinamométricas de fondo, para diagnóstico de bombeo mecánico en pozos petroleros¹⁹.”, fue la base en el estudio del método de la ecuación de onda, para el diseño sistemas de bombeo mecánico. Además los ejemplos de cartas dinamométricas de fondo a partir de datos tomados en la superficie, expuestos en esta tesis sirvieron para verificar la funcionalidad del programa desarrollado (entregable 4.4.1. programa en Matlab para la ecuación de onda).

¹⁹ FILHO, Manuel de Almeida Barreto. Geração de carta dinamométrica de fundo para diagnóstico do bombeio mecânico em poços de petróleo. Trabajo de grado para optar al título de Maestro en Ingeniería de Petróleos. Campinas-estado de São Paulo Brasil.: Universidade Estadual de Campinas. Facultad de Ingeniería Mecánica. Departamento de Ingeniería de Petróleo, 1993.

Esta tesis se encuentra disponible en un archivo.pdf, que está contenido en un CD con la carátula estándar del seminario, y lleva como título “Traducción al español de la tesis de Manuel de Almeida Barreto Filho.”

5. CONCLUSIONES

- El desarrollo de un proyecto de grado en la modalidad “seminario de investigación”, brinda a los estudiantes una herramienta válida para la formación de investigadores, fomentando la capacidad de observar, discutir, argumentar y dar solución a un problema específico.
- Un sistema de bombeo mecánico cuya capacidad excede la máxima producción del reservorio, puede ser operado con un sistema de control para garantizar la operación de la bomba aprovechando su desplazamiento total y sin presencia del golpe de fluido, mejorando así la eficiencia global y reduciendo los costos eléctricos y de mantenimiento.
- Los programas que predicen la carta dinamométrica de fondo basados en la ecuación de onda, permiten establecer con lógicas sencillas los criterios de detección de golpe de fluido, límites de carga, tiempos de operación y de reposo, velocidades óptimas de bombeo y muchos otros parámetros involucrados en los sistemas de control en el bombeo mecánico.
- Es recomendable usar varios algoritmos de detección de golpe de fluido de manera simultánea para evitar pérdidas de producción como consecuencia de las ambigüedades que se presentan cuando la bomba funciona bajo condiciones de recuperación de fluido o interferencia de gas.
- Los sistemas de control continuo basados en variadores de velocidad o motores de combustión interna, justifican su alto costo cuando el fluido bombeado tiene un alto contenido de arenas, el cual podría atascar las bombas cuando se operan con sistemas de control de encendido y apagado.

- El uso de temporizadores por porcentaje maximiza la producción y reduce considerablemente los costos eléctricos y de mantenimiento, pero deben ser periódicamente reprogramados para ajustarse a las condiciones variables del reservorio, además del desgaste de la bomba de fondo.
- La interpretación de las cartas dinamométricas de subsuelo, permite conocer el estado en que se encuentra el equipo de fondo (bomba, válvulas, tubería de producción, sarta de varillas...) y las condiciones en que el flujo está entrando a la bomba. Analizando esta información, es posible aplicar una solución adecuada para resolver los problemas encontrados en el fondo, lo que permite incrementar la producción y prevenir problemas más graves, que podrían llegar a detener la producción del pozo por completo.
- La carta dinamométrica de superficie es una composición de las condiciones dinámicas de la bomba de fondo y el ruido adicionado durante la transmisión de la información a lo largo de la sarta de varillas. La dificultad en el reconocimiento de las formas específicas de la carta de superficie aumenta en la medida que más ruido se genere, el cual es una función de la profundidad de la bomba. Un modelo matemático de la dinámica de la sarta de varillas se presentó en este trabajo y se usa como un algoritmo de filtración para el cálculo de la carta dinamométrica de fondo a partir de la carta de superficie.
- El método iterativo propuesto para la solución de la ecuación diferencial parcial de onda que modela el comportamiento dinámico de la sarta de varillas, posibilita una simulación más realista del desplazamiento útil del pistón, que aquellos que hacen una estimación a priori del coeficiente de amortiguamiento.
- El análisis de un sistema de bombeo mecánico basado en el método propuesto para la solución de la ecuación de onda juntamente con los datos de operación del pozo (test de producción, nivel dinámico de fluido en el anular tubería de producción-tubería de revestimiento, razón de gas-líquido, etc.), permite un

diagnóstico acertado aun cuando haya grandes profundidades de la bomba, carreras largas de pistón y altas velocidades de bombeo.

- Con la utilización del método API RP11L para diseñar el sistema de bombeo mecánico, se consigue pronosticar los requerimientos de cargas, tasa de producción, potencia, torque y el contra peso requerido (contrabalance). Una vez que estos parámetros sean conocidos, se selecciona el equipo apropiado que cumpla con los requerimientos establecidos.
- Los cálculos implicados en el desarrollo del método API RP11L no son complejos, pero al realizarlos se consume mucho tiempo. Con el programa computacional del método API RP11L que se desarrolló en este seminario de investigación se ahorra tiempo de cálculo, y usando los documentos API BULL 11L2 y API BULL 11L3 se facilita el diseño del sistema de bombeo mecánico.
- Antes de seleccionar el equipo de superficie y de fondo, se debe determinar la capacidad de desplazamiento que el sistema de bombeo deberá tener, asegurando suficiente capacidad en la bomba, pero evitando sobre diseñarla, esto puede hacerse usando el método del índice de productividad (IP), o el método de Vogel's. Si la tasa de bombeo es más alta que la capacidad de aporte del yacimiento al pozo, entonces el pozo podría quedarse sin nivel de fluido y se presentarían problemas en el sistema de bombeo, como lo es el golpe de fluido. De tal modo, al diseñar se parte de la tasa de producción óptima, la cual se obtiene realizando un análisis nodal en el fondo del pozo. Para un diseño óptimo debe existir un balance entre la eficiencia, cargas en la sarta de varillas y tamaño de la unidad de bombeo.
- Gracias a la implementación del software TWM, en un pozo de bombeo mecánico, se pueden obtener datos como el nivel de fluido, presiones de fondo o incluso cartas dinamométricas de superficie o de fondo, sin la necesidad de

extraer sarta de varillas o tubería de producción, por lo cual se tendrán bajos costos a la hora de realizar un análisis diagnóstico.

- Con ayuda de programas de diseño y diagnóstico para sistemas de bombeo mecánico (*RODSTAR*, *RODDIAG*, *XDIAG*), es posible la detección y corrección de problemas en el sistema de bombeo, de este modo, ayuda a extender la vida económica de campos petroleros que de otra forma no serían rentables.

6. RECOMENDACIONES

- Se recomienda realizar un proyecto en la modalidad “Trabajo de Investigación”, para modelar el comportamiento dinámico de la sarta de varillas y determinar la carta dinamométrica de fondo, utilizando el método de las diferencias finitas, con el fin de obtener la solución de la ecuación diferencial parcial de onda presentada en este trabajo.
- Se recomienda realizar un proyecto de grado en la modalidad “Trabajo de Investigación”, para el desarrollo de un modelo teórico que simule el comportamiento dinámico de la sarta de varillas teniendo en cuenta la variación de la viscosidad en función de la profundidad a la que se encuentra el fluido en su avance a la superficie, debido a la fuerte influencia de esta propiedad termodinámica en la evolución de carga de las varillas durante un ciclo de bombeo.
- Debido las consideraciones con las cuales se desarrolló el método API RP11L, este presenta muchas limitaciones al diseñar el sistema de bombeo mecánico, por lo que se recomienda utilizar modernas técnicas de diseño como la ecuación de onda desarrollado por *Sam Gibbs*, la cual utiliza un modelo matemático computarizado, que simula el comportamiento del sistema de bombeo y pronostica su comportamiento con exactitud, aunque este es mucho más complejo que el método API RP11L.
- Para el caso de las cartas dinamométricas de superficie que presenten patrones de forma aleatoria de carga, se recomienda que la simulación realizada con el software desarrollado para modelar el comportamiento dinámico de la sarta de varillas (ecuación de onda), se lleve a cabo tanto para la profundidad de asentamiento de la bomba, como para una distancia axial en

la sarta de varillas de $X_1=0$, es decir, determinar la carta dinamométrica de superficie con el software, con el fin de verificar la convergencia en la serie de Fourier. Las dos cartas, tanto la simulada como la generada con los datos de superficie, deben ser aproximadas.

- Se recomienda realizar un proyecto de grado en la modalidad “Trabajo de Investigación”, en el desarrollo de un modelo teórico que simule el comportamiento dinámico de la sarta de varillas, teniendo en cuenta la utilización de pozos desviados, ya que el modelo presentado en este trabajo aplica a pozos longitudinales.
- Se recomienda la implementación de un sistema instrumentado para la adquisición de los datos provenientes del dinamómetro, con el fin de determinar en campo las cartas dinamométricas de fondo, utilizando el software desarrollado para la simulación del comportamiento dinámico de la sarta de varillas.
- Se recomienda realizar un trabajo de investigación, para incorporar en el método propuesto para la determinación de la carta dinamométrica de fondo a partir de la carta de superficie basado en la ecuación de onda, la hipótesis adicional de flujo turbulento en el anular sarta de varillas-tubería de producción, con el fin de hacer disponible este modelo en los casos de fluidos con baja viscosidad o con alta producción de gas en la bomba.
- Se recomienda la incorporación al software propuesto para la determinación de la carta dinamométrica de fondo a partir de la carta de superficie, de las lógicas de control presentadas en este trabajo para la identificación del golpe de fluido, interferencia de gas, y límites de carga en las varillas, tanto para sistemas de control automático del bombeo tipo “pump off”, como para los sistemas de control continuo con variadores de velocidad.

- Se recomienda realizar una investigación para la determinación de las curvas de producción del pozo, a partir de los registros dinamométricos tomados en superficie y el software para la determinación de la carta dinamométrica de fondo, con el fin de establecer continuamente el tiempo óptimo de apagado del motor en unidades de bombeo operadas con controladores tipo “pump off” o RPC’s.
- Se recomienda la realización de un proyecto de investigación para el reconocimiento de patrones de la carta dinamométrica de fondo usando herramientas de inteligencia artificial, con el fin de hacer un moderno análisis diagnóstico de las curvas simuladas con el software propuesto para la determinación de las cartas dinamométricas de fondo a partir de las cartas de superficie.
- Se recomienda la implementación del algoritmo de Goertzel, para la evaluación de los coeficientes de la series de Fourier involucrados en la solución teórica de la ecuación diferencial parcial de onda presentada en esta trabajo.
- Es importante a la hora de implementar un software en el campo, la actualización de los datos o variables, que modifican el comportamiento del pozo, para que en el momento de realizar la prueba se tengan datos confiables.
- A través del desarrollo de la ecuación de onda y las variables calculadas a partir de los estudios acústicos y dinamométricos, es posible realizar un proyecto de grado en la modalidad “Trabajo de Investigación” para la creación del software de implementación pozos, para bombeo mecánico.

7. BIBLIOGRAFÍA

- API Bull 11L2. Catalog of analog computer dynamometer cards. 1969.
- API Bull 11L3. Sucker rod pumping system design book.
- API RP11L-Recommended Practice for Design Calculations for Sucker-Rod Pumping Systems (conventional units). 4th edition. 1988.
- API Specification 11E- Specification for pumping units.
- Bombeo mecánico, descripción, diseño y diagnóstico. [Anónimo].
- CHACIN, J.E. A Numerical Approach to the Diagnosis of Sucker Rod Pumping Installations and Its Verification with Downhole Pump Field Measurements. SPE 18829, 1989.
- DACUNDHA, J.J. Modeling a finite-length sucker rod using the semi-infinite wave equation and a proof of Gibbs's conjecture. SPE 108762, 2007.
- ECHOMETER COMPANY. Well analyzer and TWM software. Operating manual. Texas USA.
- eProduction Solutions, Inc., Value of Rod Pump Control. TWP.
- EVERLTT, T.A. An improved finite-difference calculation of downhole dynamometer cards for sucker rod pumps. SPE 18189, 1992.
- FILHO, Manuel de Almeida Barreto. Geração de carta dinamométrica de fundo para diagnóstico do bombeio mecânico em poços de petróleo. Trabajo de grado para optar al título de Maestro en Ingeniería de Petróleos. Campinas-estado de São Paulo Brasil.: Universidade Estadual de Campinas. Facultad de Ingeniería Mecánica. Departamento de Ingeniería de Petróleo, 1993.
- KHODABANDEH. A Simple Method for Predicting the Performance of a Sucker-Rod Pumping System. SPE 23429, 1991.

- GABOR TAKACS. Ways to Obtain Optimum Power Efficiency of Artificial Lift Installations. SPE 126544. 2010.
- GIBBS, S.G. Assumptions of the API Rod Pumping Design Method as Related to Practical Applications and Wave Equation Techniques. SPE 27988, 1994.
- GIBBS, S.G. Monitoring and Controlling Rod Pumped Wells Using Downhole Pump Cards. PETSOC, 1995.
- GIBBS, S. G. Computer diagnosis of down-hole conditions in sucker rod pumping wells.
- GUFFEY, C.G. Field testing of variable-speed beam-pump computer control. SPE 20123-PA, 1991.
- MATAIX CLAUDIO. Mecánica de fluidos y maquinas hidráulicas. Alfa y omega, segunda edición. 2005.
- M. BULÍCEK. On Kelvin-Voigt model and its generalizations. Mathematical institute of the Charles University. 2010.
- MCCOY J. N. *et al.* Improved analysis of acoustic liquid level depth measurements using a dual channel analog/digital strip chart recorder. Echometer Co
- MCCOY, JAMES N. Acoustic Velocity for Natural Gas. Echometer Co.
- MCCOY, J. N. Timer control of beam pump run time reduces operating expense. Texas, 1999.
- MCCOY, J. N. Motor Power/Current Measurement for Improving Rod Pump Efficiencies. SPE 37499, 1997
- MCCOY, J. N., *et al.* Acoustic static bottom-hole pressures. SPE 13810, 1985.
- MIRANDA, JOSÉ CARLOS. Mecanismos.

- PARTIDAS HÉCTOR. Bombeo mecánico optimización, diagnóstico y operación. PDVSA San Tomé Edo. Anzoátegui –Venezuela. 2003.
- PDVSA. Diseño de instalaciones de levantamiento artificial por bombeo mecánico. Centro internacional de educación y desarrollo (CEID). 2001.
- PETRÓLEOS DE VENEZUELA S.A. El pozo ilustrado.
- PODIO A.L., et al. Laboratory-instrumented sucker-rod pump. Society of petroleum engineers. 2003.
- ROBERTO L. SOZA. Review of Down-hole Dynamometer Testing. SPE 35217, 1996.
- ROWLAN, O. L., MACCOY, J. N. and PODIO, A. L. Best method to balance torque loadings on a pumping unit gearbox. 2005.
- SÁNCHEZ N, YOEL S., Evaluación del comportamiento de producción en pozos con unidad de bombeo hidráulico CORLIFT. Trabajo de grado para optar al título Ingeniero de Petróleos. Cabimas-Venezuela.: Universidad del Zulia. Programa de Ingeniería de Petróleos, 2010.
- SVINOS, J.G. Exact Kinematic Analysis of Pumping Units. SPE 12201. 1983.
- TENARIS. Varillas de bombeo con conexión Premium. 2009.
- THETA ENTERPRISE. Bombeo mecánico optimización, entrenamiento levantamiento artificial.
- WAYNE WESTERMAN, G. Successful application of pump-off controllers. SPE, 1977.