

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

**DIAGNÓSTICO EN POZOS CON EL SISTEMA DE PRODUCCIÓN DE
BOMBEO MECÁNICO A TRAVÉS DE LA OBTENCIÓN DE LAS CARTAS
DINAGRÁFICAS DE FONDO**

Presentado ante la ilustre
Universidad Central de
Venezuela para optar al Título
De Ingeniero de Petróleo
Por los Brs Meza R., Edixon A
Pacheco R., Heisel Y

Caracas Noviembre, 2011

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

DIAGNÓSTICO EN POZOS CON EL SISTEMA DE PRODUCCIÓN DE BOMBEO MECÁNICO A TRAVÉS DE LA OBTENCIÓN DE LAS CARTAS DINAGRÁFICAS DE FONDO

TUTOR ACADÉMICO: Prof. Sandro Gasbarri

TUTOR INDUSTRIAL: Ing. Alexander Zambrano

Presentado ante la ilustre
Universidad Central de
Venezuela para optar al Título
De Ingeniero de Petróleo
Por los Brs Meza R., Edixon A
Pacheco R., Heisel Y

Caracas Noviembre, 2011

Caracas, Noviembre 2011

Los abajo firmantes, miembros del Jurado designado por el Consejo de Escuela de Ingeniería de Petróleo, para evaluar el Trabajo Especial de Grado presentado por los Brs. Meza R. Edixon A. y Pacheco R. Heisel Y. titulado:

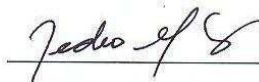
“DIAGNÓSTICO EN POZOS CON EL SISTEMA DE PRODUCCIÓN DE BOMBEO MECÁNICO A TRAVÉS DE LA OBTENCIÓN DE LAS CARTAS DINAGRÁFICAS DE FONDO”

Consideran que el mismo cumple con los requerimientos exigidos por el plan de estudios conducente al Título de Ingeniero de Petróleo, y sin que ello signifique que declaren solidarios con las ideas expuestas por el (los) autor (es), lo declaran APROBADO.



Profra. Violeta Wills

Jurado



Prof. Pedro Díaz

Jurado

Profra. Lisbeth Miranda

Tutor Académico

Ing. Alexander Zambrano

Tutor Industrial






Escuela de Ingeniería de Petróleo
Facultad de Ingeniería-UCV


ACTA

Quienes suscriben, integrantes de la totalidad del jurado examinador del Trabajo Especial de Grado, titulado: **"DIAGNÓSTICO EN POZOS CON EL SISTEMA DE PRODUCCIÓN DE BOMBEO MECÁNICO A TRAVÉS DE LA OBTENCIÓN DE LAS CARTAS DINAGRAFICAS DE FONDO"**, presentado por la Br. HEISEL PACHECO, titular de la Cédula de Identidad No. 18.141.579. Para optar al título de Ingeniero de Petróleo, acordaron por unanimidad solicitarles a las autoridades correspondientes de la Facultad de Ingeniería, tengan a bien otorgar **MENCIÓN HONORÍFICA** al Trabajo de Grado antes mencionado.

Esta solicitud se hace con base a la originalidad del enfoque utilizado para tratar el tema presentado y a la excelencia, tanto de su contenido como de su presentación formal, atributos que lo convierten en una fuente de referencia útil.

Se levanta la presente Acta en Caracas, a cuatro (04) días del mes de noviembre del año dos mil once.


Prof. Pedro Díaz
Jurado Principal


Prof. Violeta Wills
Jurado Principal

Prof. Lisbeth Miranda
Tutora Académica





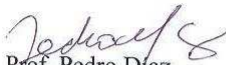
**Escuela de Ingeniería de Petróleo
Facultad de Ingeniería-UCV**


ACTA

Quienes suscriben, integrantes de la totalidad del jurado examinador del Trabajo Especial de Grado, titulado: “**DIAGNÓSTICO EN POZOS CON EL SISTEMA DE PRODUCCIÓN DE BOMBEO MECÁNICO A TRAVÉS DE LA OBTENCIÓN DE LAS CARTAS DINAGRAFICAS DE FONDO**”, presentado por el Br. EDIXON MEZA, titular de la Cédula de Identidad No. 16.202.146. Para optar al título de Ingeniero de Petróleo, acordaron por unanimidad solicitarles a las autoridades correspondientes de la Facultad de Ingeniería, tengan a bien otorgar **MENCIÓN HONORÍFICA** al Trabajo de Grado antes mencionado.

Esta solicitud se hace con base a la originalidad del enfoque utilizado para tratar el tema presentado y a la excelencia, tanto de su contenido como de su presentación formal, atributos que lo convierten en una fuente de referencia útil.

Se levanta la presente Acta en Caracas, a cuatro (04) días del mes de noviembre del año dos mil once.


Prof. Pedro Díaz
Jurado Principal


Prof. Violeta Wills
Jurado Principal

Prof. Lisbeth Miranda
Tutora Académica



DEDICATORIA

A Dios y a la Virgen del Valle por darme la salud para poder alcanzar mis metas.

A mis padres Ysmael Pacheco y Mireya Romero por su apoyo, confianza y comprensión.

A mis hermanos; Hedley Pacheco y Engel Pacheco por poder contar con ustedes siempre.

A Romer Goitia por su comprensión y apoyo a lo largo de toda mi carrera.

A mi tío José Camara Leme †

A mi tía Angela Romero †

A toda mi familia.

Heisel Pacheco

AGRADECIMIENTOS

A Dios por permitirme recorrer el camino que quería y sembrarme la fuerza y la fé que me llevó a alcanzar esta meta.

A la Virgen del Valle por guiarme, recibir mis peticiones y concedérmelas.

A la Universidad Central de Venezuela, por ser la casa de estudio que permitió que lograra mi formación como profesional, así como también a todos los profesores tanto del núcleo de Cagua como de la escuela de Ingeniería de Petróleo, que contribuyeron con este proceso.

A mis padres por ser un apoyo incondicional en cada momento de mi vida y a lo largo de mis estudios, quienes me alentaron cuando llegue a decaer y pude contar con ellos siempre; son las personas más importantes en mi vida, gracias infinitamente. Este meta alcanzada les pertenece y espero siempre poder hacerlos sentir muy orgullosos de mi.

A mi hermano y hermana por apoyarme siempre que lo necesite, gracias por su ayuda muchachos y por ser los hermanos unidos con los que puedo contar incondicionalmente.

A Romer con quien pude y puedo contar en todo momento, por ser una persona especial que recorrió este camino conmigo, por brindarme su ayuda, escucharme y animarme cuando necesitaba palabras alentadoras.

A mis abuelos y a mi tía Zulay, por ofrecerme su ayuda y apoyo al no estar en mi casa, para poder seguir este sueño. Muchas gracias.

A todas las personas que conocí a lo largo de la carrera, en el núcleo de Cagua y en la escuela de Ingeniería de Petróleo; se que de cada una de ellas aprendí algo para mi vida; sobre todo a mis amigos quienes considero personas importantes e inolvidables, Henry Andrade, Edgar Trejo, Maicol Pontes, Carmen Herrera, Wendy Uzcategui,

Oscar Utrera, Yuneidy Rojas, Howard Matos, Justo Jara, Jesús León y Edixon Meza.
Gracias a todos por ser buenos amigos.

Al profesor Juan Guevara de la Facultad de Ciencias por su excelente colaboración, y orientación a lo largo del desarrollo del presente Trabajo Especial de Grado y por ofrecernos su paciencia, tiempo y dedicación con la finalidad de ayudarnos.

Al profesor Sandro Gasbarri por su asesoramiento y aporte de ideas para la ejecución del trabajo.

Al Ing. José Ercolino por su gentileza al colaborar con la ejecución de nuestro Trabajo Especial de Grado, sus conocimientos, experiencia y dedicación fueron de mucha utilidad.

A la Profesora Lisbeth Miranda por su ayuda y recibirnos como sus tesisas, y por su asesoramiento siempre que lo necesite durante la carrera.

Al Ing. Alexander Zambrano por otorgarnos sus ideas al ofrecernos un tema para poder desarrollar nuestro Trabajo Especial de Grado.

Heisel Pacheco

DEDICATORIA

A Dios por ofrecerme salud para enfrentar los obstáculos que se encontraban en mis metas.

A mis padres ya que su esfuerzo y dedicación me permitió crecer personal y profesionalmente.

.A mi hermano quien fue mi ayuda incondicional en cualquier situación.

A mis familiares quienes me dieron su apoyo cuando me era necesario.

A mis amigos de infancia ya que con ellos compartí todos mis éxitos.

Edixon Meza

AGRADECIMIENTOS

A la UCV por ser mi casa durante toda mi formación como futuro profesional.

A todo el personal docente ya que ellos me formaron profesionalmente.

Al personal administrativo y obrero ya que facilitaron e hicieron de la UCV un ambiente agradable para llevar a cabo mi aprendizaje.

A todos mis compañeros de estudio ya que ellos me ayudaron a enfrentar los obstáculos durante toda la carrera y hacer de ella una experiencia inolvidable.

Al profesor Juan Guevara ya que siendo un profesor de la Facultad de Ciencias me proporcionó toda su ayuda y conocimientos durante toda la tesis.

Al Ing. José Ercolino ya que fue de muchísima ayuda en la solución de inconvenientes presentados durante la tesis.

Al profesor Sandro Gasbarri ya que nos proporcionó información valiosa para realizar el Trabajo Especial de Grado.

Al Ing. Alexander Zambrano y a la consultora OPICA por ofrecer temas a la línea de investigación de la Escuela de Ingeniería de Petróleo y ayudarnos a desarrollar el mismo.

A la profesora Lisbeth Miranda ya que nos recibió como tutora y por contar con ella siempre a lo largo de toda mi carrera profesional.

Edixon Meza

Meza R., Edixon A.

Pacheco R., Heisel Y.

DIAGNÓSTICO EN POZOS CON EL SISTEMA DE PRODUCCIÓN DE BOMBEO MECÁNICO A TRAVÉS DE LA OBTENCIÓN DE LAS CARTAS DINAGRÁFICAS DE FONDO.

Tutor académico: Prof. Sandro Gasbarri Tutor industrial: Ing. Alexander Zambrano. Tesis. Caracas, UCV. Facultad de ingeniería. Escuelas de ingeniería de petróleo. Año 2011. Número de páginas 1.

Palabras claves: BOMBEO MECÁNICO, CARTAS DINAGRÁFICAS, MÉTODOS NUMÉRICOS, MATLAB.

Resumen. El objetivo del trabajo es realizar un diagnóstico del sistema de levantamiento artificial por bombeo mecánico en pozos productores de petróleo; para ello se realizó una profunda investigación del sistema de levantamiento artificial, lo que ofrece información vital sobre su funcionamiento para saber, donde y como se presentan las fallas en el mismo, así como también el método de diagnóstico más eficaz para detectar dichas fallas. La metodología consta de tres fases; la primera fase consiste en la recopilación de fundamentos teóricos mediante la utilización de libros, y publicaciones científicas, las cuales ofrecen el soporte teórico necesario para atacar el problema en cuestión. La segunda fase se basa en la elección y desarrollo de un método numérico que nos permitirá la obtención de las cartas dinagráficas de fondo teniendo como dato la carta dinagráfica de superficie. Para finalmente en la tercera fase desarrollar un algoritmo y ejecutarlo en un lenguaje computacional, en este caso MATLAB, para así llevar a cabo el objetivo propuesto. De esta manera se obtuvo una aproximación aceptable de las cartas dinagráficas de fondo para el caso de una sarta de cabillas uniforme; ya que, el mismo se puede validar con datos previamente obtenida, demostrando así que es una herramienta eficaz al momento de ofrecer un diagnóstico en el sistema de levantamiento artificial por bombeo mecánico.

CONTENIDO

Índice de figuras	ix
Índice de tablas.....	xi
Introducción.....	1
Capítulo I: Planteamiento del problema.....	3
El problema.....	3
Objetivos.....	4
Objetivo General.....	4
Objetivos Específicos.....	4
Alcance.....	5
Justificación.....	5
Capítulo II: Marco Teórico.....	6
Bombeo Mecánico.....	6
Componentes del Sistema.....	8
Equipos de Superficie.....	8
Equipos de Subsuelo.....	19
Análisis del Sistema de Bombeo Mecánico.....	36
El Dinamómetro.....	36
Cartas Dinagráficas.....	37
Interpretación de las Cartas Dinagráficas.....	38
Cargas Obtenidas Usando un Dinagrama.....	48
Factores que Modifican la Forma de un Dinagrama.....	54
Capítulo III: Metodología.....	57
Fase de investigación.....	57
Fase de Selección del Método Numérico.....	58
Fase de Deducción de la Ecuación de Onda.....	61
Fase de Discretización de la Ecuación de Onda.....	63
Fase de Adiestramiento con la Herramienta Computacional.....	66
Fase Generación del Código del Programa.....	67
Fase de Validación.....	67

Fase de Interpretación de la Cartas Dinagráficas.....	68
Capítulo IV: Resultados y Análisis.....	70
Especificaciones del Programa.....	70
Validación del Programa.....	76
Interpretación Cualitativa Caso 1.....	80
Interpretación Cuantitativa Caso 1.....	80
Interpretación Cualitativa Caso 2.....	82
Interpretación Cuantitativa Caso 2.....	82
Conclusiones.....	83
Recomendaciones.....	85
Referencias Bibliográficas.....	86
Bibliografía.....	88
Glosario.....	90
Apéndice A: Código de la Herramienta.....	92
Apéndice B: Datos de las Cartas Dinagráficas de Superficie.....	113

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 Elementos Básicos de un Pozo con Bombeo Mecánico.....	7
Figura 2.2 Balancín Balanceado por Aire “Tipo A”.....	14
Figura 2.3 Unidad de Uñitorque MARK II “Tipo M”.....	15
Figura 2.4 Funcionamiento de la Bomba de Subsuelo.....	16
Figura 2.5 Bomba de Tubería.....	20
Figura 2.6 Bomba de Cabillas Anclaje Inferior.....	22
Figura 2.7 Bomba de Revestidor.....	24
Figura 2.8 Nomenclatura de la Bomba.....	24
Figura 2.9 Desplazamiento de la Bomba vs Profundidad.....	25
Figura 2.10 Ancla de Gas.....	29
Figura 2.11 Dinagráfica Ideal.....	35
Figura 2.12 Interferencia por Gas.....	37
Figura 2.13 Golpe de Fluido.....	38
Figura 2.14 Fuga en la Válvula Viajera o el Pistón.....	39
Figura 2.15 Fuga en la Válvula Fija.....	40
Figura 2.16 Ancla de Tubería en Mal Funcionamiento.....	41
Figura 2.17 Pistón Golpeando Abajo.....	42
Figura 2.18 Barril de la Bomba Doblado o Pegándose.....	43
Figura 2.19 Barril de la Bomba Gastado o Partido.....	44
Figura 2.20 Otros Problemas.....	45
Figura 2.21 Otros Problemas (continuación).....	46
Figura 2.22 Análisis de Cargas.....	47
Figura 2.23 Máxima Carrera del Pistón.....	48
Figura 3.1 Malla Generada Mediante el Uso del Método Numérico.....	65
Figura 3.2 Generación de Desplazamientos en la Malla.....	66
Figura 4.1 Ventana Principal del Programa DinaHEPM.....	71

Figura 4.2 Ventana Para Cargar la Carta de Superficie.....	72
Figura 4.3 Ventana Para Guardar los Datos de la Carta de Superficie.....	73
Figura 4.4 Ventana Para Cargar los Datos del Pozo.....	74
Figura 4.5 Ventana Para Cargar los Datos de la Bomba.....	75
Figura 4.6 Carta dinográfica de Superficie del Caso 1.....	77
Figura 4.7 Carta dinográfica de Superficie del Caso 2.....	79
Figura 4.8 Carta dinográfica de Fondo del Caso 1.....	80
Figura 4.9 Carta Dinográfica de Fondo del Caso 2.....	81

LISTA DE TABLAS

Tabla 2.1 Área del Pistón y Constante de la Bomba.....	30
Tabla 2.2 Sartas de Cabillas Recomendadas por Tamaño de Bombas... ..	33
Tabla 2.3 Pesos y Dimensiones de Cabillas Convencionales y Continuas.....	33
Tabla 2.4 Características de las cabillas de producción.....	34
Tabla 4.1 Datos de la Cabilla Caso 1.....	76
Tabla 4.2 Datos de Fondo.....	77
Tabla 4.3 Datos de la Unidad de Bombeo.....	77
Tabla 4.4 Datos de la Cabilla Caso 2.....	78
Tabla 4.5 Datos de Fondo.....	78
Tabla 4.6 Datos de la Unidad de Bombeo.....	78
Tabla 4.7 Resultados de la interpretación Cuantitativa Caso1.....	81
Tabla 4.8 Resultados de la interpretación Cuantitativa Caso2.....	82

INTRODUCCIÓN

Los mecanismos de levantamiento artificial se encargan de suministrar la energía adicional que proporciona el diferencial de presión necesario para llevar los fluidos del fondo del pozo a superficie, ya que el yacimiento carece de dicha energía para cumplir este propósito (Esto se puede presentar en yacimientos agotados o yacimientos de baja presión).

Uno de estos mecanismos es el Bombeo Mecánico, el cual se caracteriza por la instalación de una bomba de subsuelo de acción recíproca que es abastecida con energía transmitida a través de una sarta de cabillas; esta energía proviene a su vez de un motor eléctrico o de combustión interna el cual moviliza la unidad de superficie mediante un sistema de engranajes y correas. El movimiento rotativo en la unidad de superficie se convierte en movimiento recíproca en el subsuelo, cuya función es transmitir la potencia hasta la bomba de fondo para levantar los fluidos a superficie, mediante la utilización de cabillas.

Este método es el más utilizado en Venezuela por su fácil manejo y bajos costos tanto de mantenimiento como de instalación, además si es operado correctamente, este sistema de levantamiento artificial podría tener una eficiencia de 50%, sin embargo problemas comunes como golpe del fluido, pistón de la bomba desgastado, fugas en la válvula viajera o fija o unidad severamente fuera de desbalance y fallas del equipo pueden reducir esta eficiencia hasta menos de un 30%. Por esta razón se propone realizar una herramienta computacional que permita diagnosticar el comportamiento de este sistema de levantamiento, mediante la obtención de las cartas dinográficas de fondo que al ser interpretadas de una manera eficiente se optimiza el proceso de producción.

En el siguiente trabajo se presenta la utilización de un método escogido como el más idóneo para calcular estas cartas dinográficas de fondo, este es el método de diferencias finitas, el cual es usado para resolver la ecuación de onda la cual representa el movimiento de la sarta, a través de esto se simula matemáticamente el

comportamiento dinámico de la misma. Las condiciones de borde para esta ecuación surgen de la medición de variables en superficie (fuerza y desplazamiento), el resultado de esta medición se denomina carta dinográfica de superficie.

Finalmente se obtienen cartas dinográficas de fondo a partir de las cartas dinográficas de superficie, resolviendo la ecuación de onda mediante las diferencias finitas, además de ello se discuten los resultados obtenidos mediante la interpretación cualitativa y cuantitativa que se realiza de cada carta dinográfica de fondo de los dos casos utilizados que permitieron validar la herramienta computacional generada.

CAPÍTULO I

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1 EL PROBLEMA

Los yacimientos de hidrocarburos eventualmente no son capaces de producir fluidos a tasas económicamente rentables con su propia energía. La única manera de obtener una alta tasa de producción de un pozo es aumentar el diferencial de presión disminuyendo la presión en el fondo del pozo con métodos de levantamiento artificial.

Aproximadamente el 50% de los pozos a nivel mundial necesitan sistemas de levantamiento artificial, cada método tiene aplicaciones para una producción óptima; una selección adecuada del método de levantamiento artificial para un sistema de producción dado (yacimiento, propiedades del fluido, configuración del pozo y restricciones de superficie) requiere un conocimiento y manejo del mismo, entre estos mecanismos de levantamiento artificial se encuentra el Bombeo Mecánico.

Al utilizar el Bombeo Mecánico como sistema de levantamiento artificial se pueden encontrar problemas frecuentes, como las partiduras en la sarta de cabillas las cuales son causadas por efectos de corrosión, fatiga, fricción, excesos en el límite de tolerancia; que reducen la eficiencia del mismo es por ello que el operador debe tener un buen conocimiento del mecanismo basado en la correcta interpretación de las cartas dinográficas las cuales son la representación de los esfuerzos en las cabillas en función de la posición, con el fin de diagnosticar a tiempo y ofrecer soluciones inmediatas.

Actualmente, para lograr este fin el operador cuenta con avances tecnológicos computacionales que los últimos años han revolucionado la industria del petróleo permitiendo mejorar el análisis del sistema de levantamiento de Bombeo Mecánico

para optimizar el mismo. Uno de estos avances es la generación de las cartas dinagráficas de fondo, a través de ellas y mediante una correcta interpretación se puede evitar o conocer distintas situaciones relacionadas con el estado de funcionamiento de la bomba, las condiciones de producción del pozo y las variaciones de la carga.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo General

Realizar un diagnóstico en pozos con el sistema de producción de bombeo mecánico a través de la obtención de las cartas dinagráficas de fondo con el fin de caracterizar dicho sistema de producción.

1.2.2 Objetivos Específicos

- ✓ Realizar una revisión bibliográfica del mecanismo de levantamiento artificial por bombeo mecánico apoyada en artículos técnicos, trabajos especiales de grado, manuales y libros de texto.
- ✓ Analizar el comportamiento del levantamiento artificial por bombeo mecánico.
- ✓ Determinar la carta dinagráfica de fondo mediante el uso de las cartas dinagráficas de superficie y de la ecuación de onda.
- ✓ Evaluar el comportamiento de la bomba mediante la carta dinagráfica de fondo.
- ✓ Analizar las diversas representaciones del comportamiento de la bomba, ante distintos problemas utilizando las cartas dinagráficas de superficie.
- ✓ Realizar una herramienta computacional que permita la obtención de cartas dinagráficas de fondo a partir de las cartas dinagráficas de superficie.

1.3 ALCANCE

Elaborar una herramienta computacional que permita generar cartas dinagráficas de fondo a través de la carta dinagrafica de superficie de un pozo determinado para poder inferir a través de ella los problemas existentes en el pozo.

1.4 JUSTIFICACIÓN

Medir variables en superficie es fundamental para tener un conocimiento adecuado de las condiciones de operación, es por ello; que el uso de las cartas dinagráficas son importantes para determinar el funcionamiento de un equipo de bombeo mecánico, y haciendo uso de métodos apropiados se puede obtener la carta dinagráfica de fondo que al ser interpretadas correctamente ayuda a deducir las condiciones de la bomba o posibles problemas existentes para aplicar soluciones pertinentes. Es importante tener un sistema computarizado que permita generar las cartas dinagráficas de fondo a través de la información que generan las cartas de superficie.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

El siguiente capítulo muestra una descripción detallada del mecanismo de producción de Bombeo Mecánico, con la finalidad de que pueda entenderse el funcionamiento de este sistema; por lo que se presenta información completa de cada uno de los componentes que lo conforman ,además de ello recopila información de las cartas dinagráficas y su interpretación, mostrando el recorrido de un ciclo del sistema, igualmente se encuentran los problemas que pueden presentarse en este sistema y como éste quedaría representado en un carta dinagráfica.

2. BOMBEO MECÁNICO

El mecanismo de bombeo mecánico suministra energía para levantar el petróleo del fondo del pozo a superficie, esencialmente transformando la presión del líquido en energía potencial, el líquido entra a la bomba a cierta presión conocida como presión de succión y es llevada a una alta presión conocida como presión de descarga. Se conoce como presión de la bomba a la diferencia entre la presión de descarga y la presión de succión, esta presión corresponde a la energía potencial que le es entregada al líquido, esta energía representa sólo una fracción del trabajo total realizado por el sistema de bombeo mecánico. La eficiencia depende fundamentalmente de cuánto de este trabajo mecánico pueda ser convertido en energía potencial para ser entregada a dicho fluido; una buena predicción del rendimiento del sistema puede mejorar la eficiencia del mismo. Este sistema es eficiente, simple, fácil de operar, puede levantar hidrocarburos de pozos con muy bajas presiones para maximizar la tasa de producción. Es aplicable a completaciones múltiples e hidrocarburos viscosos y de alta temperatura. El sistema es fácil de cambiar a otros y con bajos costos. Las grandes desventajas del bombeo mecánico son los problemas con los sólidos, tiene baja eficiencia con pozos que contienen gas y la profundidad debido los esfuerzos que deben soportar las cabillas.

El sistema de bombeo mecánico consiste en una unidad de bombeo en superficie y una bomba sumergida en el pozo. La fuerza motriz proviene de un motor eléctrico o un motor de combustión interna, los motores eléctricos son más comunes porque pueden automatizarse. La fuerza motriz es transmitida al eje de entrada de un equipo reductor por una cadena de transmisión. El eje de salida del equipo reductor conduce a la biela a una baja velocidad (4-40 revoluciones por minuto (rpm), dependiendo de las características del pozo y de las propiedades de los fluidos).

El movimiento rotatorio de la biela es convertido a un movimiento oscilatorio por medio del balancín. La cabeza del balancín y la guaya son usadas para asegurar que las cabillas estén tensionadas y verticales todo el tiempo. La barra pulida y la prensa estopa se combinan para mantener un buen sello del líquido en la superficie.

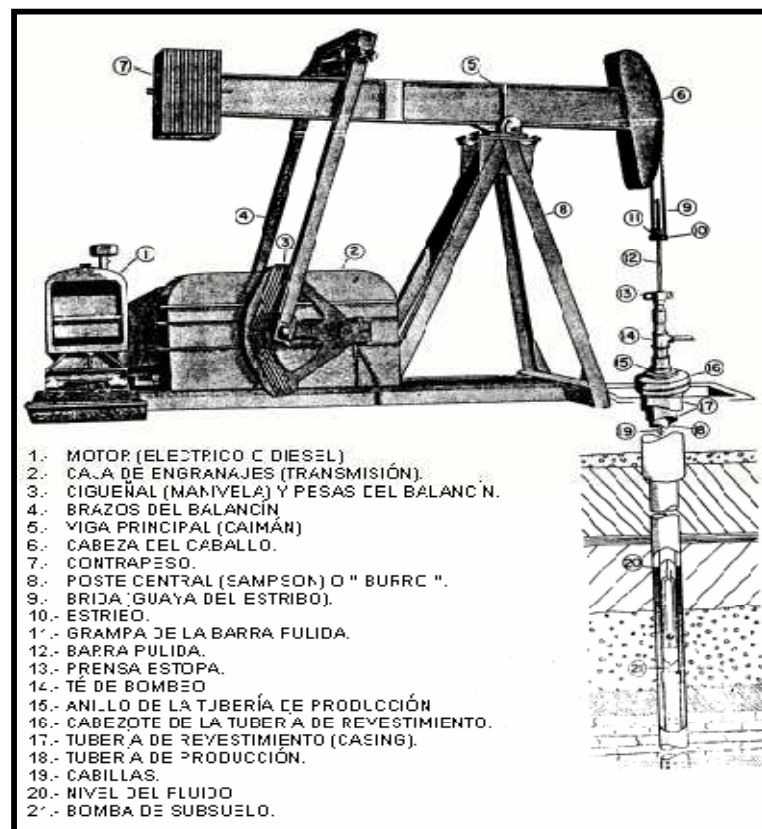


Figura 2.1 Elementos Básicos de un pozo con bombeo mecánico^[1]

2.1 COMPONENTES DEL SISTEMA^[3]

2.1.1 Equipos de Superficie:

A. Unidad Motriz:

La unidad motriz es típicamente un motor eléctrico o a gas, la mayoría de las unidades motrices son motores eléctricos. La función de la unidad motriz es suministrar la potencia que el sistema de bombeo necesita y afecta el consumo de energía y las cargas de la caja de engranaje. Los hp del motor dependen de la profundidad, del nivel de fluido, de la velocidad de bombeo y del balanceo de la unidad. El tamaño de la unidad motriz tiene un impacto significativo en la eficiencia del sistema, en la mayoría de los campos petroleros los motores están usualmente sobredimensionados, lo que garantiza que estarán disponibles suficiente caballos de fuerzas en el sistema pero al precio de bajar la eficiencia.

Los motores eléctricos alcanzan sus eficiencias más altas cuando las cargas están cercanas a la potencia de diseño, cuando un motor está poco cargado la eficiencia es menor. Los motores eléctricos y a gas son componentes de bajo torque y altas revoluciones por minutos (rpm), la variación de velocidad de la unidad motriz afecta la caja de engranaje, las cargas en las cabilla y también la velocidad de bombeo. Altas variaciones de velocidad en el motor reducen el torque neto en la caja de engranaje.

En la carrera ascendente, donde la barra pulida soporta las mayores cargas, el motor desacelera, debido a esta reducción de velocidad la inercia de los contrapesos ayuda a reducir el torque de la caja de engranaje liberando energía cinética almacenada, esto también reduce las cargas pico en la barra pulida reduciendo su aceleración. En la carrera descendente la unidad acelera resultando en cargas mínimas sobre la barra pulida por lo tanto resulta en rangos bajos de tensión y por ende en disminución de la fatiga en las cabillas.

▪ **Motores Eléctricos:**

La corriente eléctrica es proporcionada por estaciones generadoras a través de líneas de transmisión; un motor eléctrico es razonablemente eficiente cuando opera dentro de su rango de capacidad y con un torque relativamente uniforme.

La capacidad de los motores eléctricos para realizar el trabajo se encuentra afectada por la cantidad de calor disipada en un intervalo de tiempo dado, la pérdida de calor se debe principalmente a que el motor impulsa una carga cíclica muy variable, cuando se logra una carga torsional uniforme disminuyen los requerimientos de corriente eléctrica.

Los motores eléctricos para bombeo mecánico son principalmente motores de inducción de tres fases. NEMA D (*National Electrical Manufacturers Association*) clasifica los motores según el deslizamiento y las características de torque durante el arranque. NEMA D es el motor de unidad de bombeo más ampliamente reconocido; su rango de deslizamiento va desde 5 % hasta 13%. Otros motores en el campo petrolero incluyen NEMA C con un máximo deslizamiento de 5 % y NEMA B con un máximo deslizamiento de 3%.

Para la selección de los motores eléctricos los criterios se basan en la unidad de bombeo seleccionada, las propiedades de los fluidos del pozo, las características del pozo y las características de los equipos de subsuelo.

▪ **Motores de Combustión Interna:**

Se han utilizado estos motores durante muchos años en Venezuela, sin embargo la mayoría de los motores usados por bombeo mecánico son eléctricos. Los motores a gas son primordialmente utilizados en locaciones remotas sin disponibilidad de electricidad.

Existen dos tipos de motores a gas; Motores de baja velocidad con uno o dos cilindros los cuales tienen velocidades de 700 rpm o menos y alto torque. Motores

multicilindros de alta velocidad, que pueden tener altas variaciones de velocidad (hasta un 35%) más que motores de baja velocidad.

El principio de funcionamiento de los motores de combustión interna se basa en la ignición de una mezcla aire-combustible de un cilindro. El motor de combustión interna trabaja más eficientemente cuando opera dentro de su capacidad promedio y con una carga de torque relativamente uniforme; en este caso se requiere menor cantidad de combustible para realizar un trabajo dado. Los motores a gas generalmente queman gas rentado y usualmente son más económicos que operar motores eléctricos; sin embargo los costos de capital y de mantenimiento son mayores a los de motores eléctricos.

B. Unidad de Bombeo

Las principales funciones de la unidad de bombeo son, cambiar el movimiento angular de la unidad motriz a un movimiento reciprocante lineal, reducir la velocidad del motor para mejorar la velocidad de la bomba. Por supuesto la unidad debe disponer de suficientes equipos y de capacidad estructural para soportar la carga máxima inducida por la sarta de cabillas.

La mayoría de las unidades emplean una manivela y un mecanismo de balancín para obtener un movimiento reciprocante. La manivela y el balancín proveen medios para contrarrestar la condición de carga cíclica de la cabilla de bombeo para un funcionamiento eficaz. Es usado usualmente un sistema de reducción para disminuir la velocidad del motor a una velocidad adecuada para la barra pulida.

▪ **Aspectos Esenciales en el Diseño de la Unidad de Balancín:** ^[1]

- **Sistema Reductor de Velocidades:** convierte la energía del momento rotacional sometido a las altas velocidades del motor primario a energía de momento rotacional de baja velocidad. La maquina motriz se somete al equipo reductor de velocidad (caja de engranaje) mediante correas. El reductor de velocidad puede ser tres tipos: simple, doble y triple; la reducción doble es la más usada cuya relación de engranajes es 30:1.
- **Sistema de Articulación:** Tiene por objeto trasladar el movimiento rotatorio primario a reciprocante, lo cual se realiza a través de la manivela- biela –viga-balancín.
- **Sistema de Contrapeso:** Distribuye de forma equilibrada las cargas durante el ascenso y descenso para reducir la potencia máxima efectiva y el momento máximo rotacional.

Alguna de las unidades usan contrapeso en el balancín y otras usan cilindros de aire comprimidos para compensar las cargas en ambas carreras. En la industria petrolera se ha utilizado los balancines tradicionales del tipo contrapeso tipo **C**, balancines balanceados por aire tipo **A** y unidades de unitorque (MARK II) tipo **M**.

▪ **Nomenclatura de Balancines** ^[2]:

La API ha desarrollado un método estándar para describir las unidades de bombeo:

Ejemplo: **C-320D-256-100**

La primera letra representa el tipo de unidad; **C** significa unidad convencional, **M** significa unidad Mark II y **A** significa unidad balanceada por aire; para el caso de nuevos tipos de unidades podrían usarse combinaciones de letra como **RM** que significa unidad Lufkin Mark Revers.

El primer número representa la capacidad de carga de la caja de engranaje en miles libras-plg (torque) y va acompañado de una letra que representa el tipo de reducción empleada; en el caso de las unidades convencionales utilizan un sistema de doble reducción por ello la letra D.

El segundo número representa la capacidad de la estructura en cientos de libras.

El último número representa la máxima longitud de la carrera en pulgadas.

▪ **Criterios de Selección de Balancines:**

• **Productividad del Pozo:**

- Los equipos de superficie deben ser capaces de soportar las cargas que generan la unidad de bombeo y los fluidos en el pozo.
- Los equipos de superficie deben ser capaces de manejar la producción disponible.

• **Profundidad:**

- Grandes profundidades requieren el uso de bombas de subsuelo de largos recorridos.
- La profundidad afecta las cargas originadas por los equipos de producción en el pozo.
- La profundidad es el factor determinante en los esfuerzos de tensión, elongación y del peso.

• **Disponibilidad de Balancines:**

- Los balancines subdiseñados limitan las dimensiones del equipo de producción y a su vez la tasa de producción del pozo.
- Los balancines sobre diseñados, pueden poseer capacidad, carga, torque y carrera muy por encima de lo requerido y puede resultar antieconómico.

• **Gravedad API**

- La cual determina el peso del fluido sobre la bomba y afecta el torque máximo aplicado sobre la barra pulida.

- **Costo:**

- El costo de la unidad de bombeo y de su mantenimiento determina su instalación en pozos donde podría usarse modelos de diferentes tamaños.

- **Criterios Secundarios:**

- Longitud de la línea de flujo.
- Diámetro de la línea de flujo.
- Condiciones ambientales (Temperatura, Humedad, etc.).

- **Tipos de Unidades de Balancín:**

- **Unidad de Bombeo Convencional:**

Ventajas:

- Es fácil de manejar.
- Costos de mantenimientos bajos.
- La unidad de balanceo mecánico no se repara.
- Requiere menos contrabalanceo que las Mark II.
- Puede bombear más rápido que las unidades Mark II.
- Puede rotar en sentido horario y antihorario con las mismas características de funcionamiento.

Desventajas:

- Se requiere de una cuadrilla para su balanceo, su peso elevado dificulta su manejo, pero no se logra balanceos correctos.
- En muchas aplicaciones no es tan eficiente como la unidad Mark II u otros tipos de unidades.
- Puede que requiera cajas de engranaje más grandes que otros tipos de unidad (especialmente con cabillas de acero).

En la figura 2.22 se muestra una unidad de bombeo convencional con sus componentes

- Pérdidas de producción considerables por reparación de la unidad de balanceo.
- La caja de engranaje podría dañarse si el cilindro pierde la presión de aire. La figura 2.3 muestra la unidad de bombeo balanceada por aire y los componentes que la conforman.

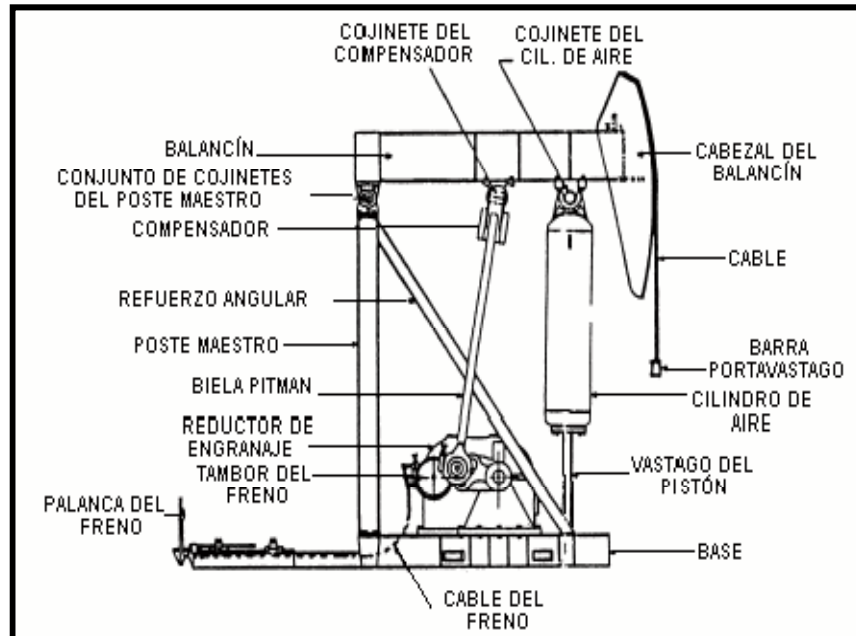


Figura 2.3 Balancín balanceado por aire "Tipo A" [2]

- **Unidad de Bombeo Mark II:**

Ventajas:

- Tiene menor torque en la mayoría de los casos; debido a su forma y contrapeso.
- Requiere menos caballaje.
- La embolada ascendente es algo más lenta y la descendente más rápida redonda en menores cargas máximas y mayor duración de las cabillas de succión.
- Es más eficiente que las unidades convencionales en la mayoría de los casos.

Desventajas:

- En varias aplicaciones no puede bombear tan rápido como una unidad convencional debido a su velocidad en la carrera descendente.
- Solo puede rotar en sentido antihorario.
- En caso de existir golpe del fluido podría causar más daño a la sarta de cabillas y a la bomba.
- Puede colocar la base de la sarta de cabillas en severa compresión causando fallas por pandeo.
- Puede experimentar torques más altos que las unidades convencionales cuando se usan cabillas de fibra de vidrio, además, de la posibilidad de colocarlas en compresión. La figura 2.4 muestra la unidad de bombeo Mark II con sus componentes.

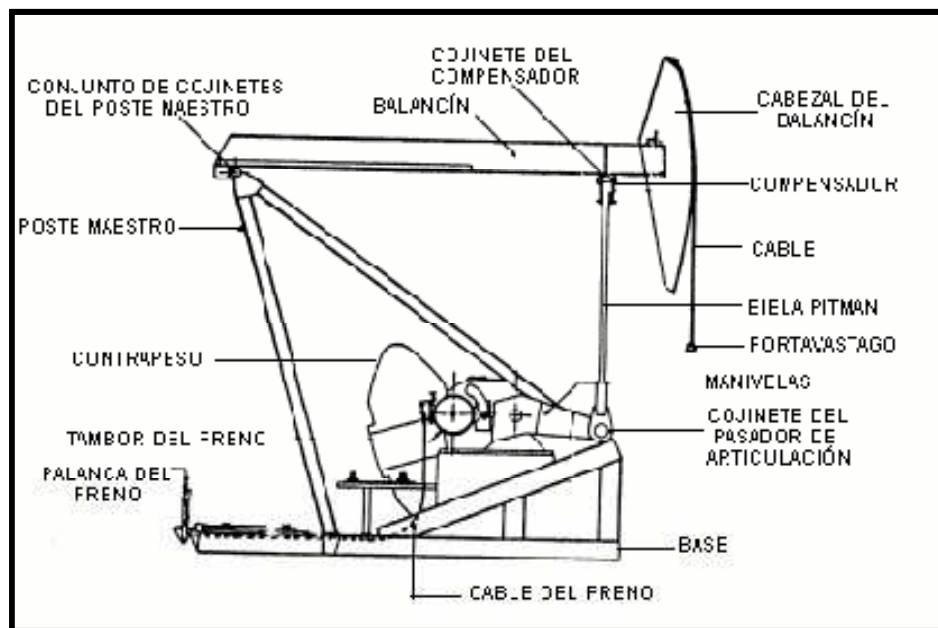


Figura 2.4 Unidad de Uñitorque MARK II "Tipo M" [2]

C. Caja de Engranaje:

La caja de engranaje tiene como función convertir torques bajos en torques altos y convertir altas rpm en bajas rpm, necesarias para operar la unidad de bombeo. Una reducción común de una caja de engranaje es 30:1; lo cual significa que la misma reduce las rpm a la entrada treinta veces mientras intensifica el torque de entrada treinta veces.

D. Contrapesos:

Los contrapesos ayudan a reducir el torque que la caja de engranaje debe suministrar, estos ayudan a la caja de engranaje en la carrera ascendente cuando las cargas en la barra pulida son más grandes. En la carrera descendente, la caja de engranaje levanta los contrapesos con la ayuda de las cargas de las cabillas, quedando listos para ayudar de nuevo en la carrera ascendente. Es decir, en la carrera ascendente los contrapesos proporcionan energía a la caja de engranaje y en la carrera descendente los mismos almacenan energía. Lo ideal operacionalmente es igualar el torque en la carrera ascendente y descendente usando la cantidad correcta del momento del contrabalanceo, cuando esto pasa, la unidad está balanceada.

Si una unidad no está balanceada puede sobrecargar el motor y la caja de engranaje; lo que puede traer como consecuencia fallas costosas y pérdidas de producción si no es corregido a tiempo; para evitarlo debe determinarse si la unidad está balanceada mediante un análisis de torque o registrar un gráfico de amperaje del motor en la carrera ascendente y descendente.

E. Barra Pulida:

Es el elemento que conecta la unidad de bombeo a la sarta de cabillas, posee una superficie lisa y brillante que previene el desgaste de las empacaduras del prensa estopa. Si el pozo no produce suficiente petróleo para mantener lubricada la barra pulida entonces un lubricador se instala encima del prensa estopa. Su función

principal es soportar el peso de la sarta de cabillas, bomba y fluido; por ello la barra pulida es la que experimenta cargas más altas que cualquier otra parte de la sarta.

F. Prensa Estopa:

Las empacaduras del prensa estopa están diseñadas para prevenir fugas de fluido en el cabezal y para ello son apretadas; pero si se aprietan demasiado podrían incrementarse las pérdidas de potencia en la barra pulida resultando en una mala interpretación de la carta dinográfica por la distorsión de las cargas sobre la barra pulida.

G. Líneas de Flujo:

Estas conectan al cabezal del pozo con el separador y altas presiones en la misma pueden generar altas cargas en la barra pulida y una baja en la eficiencia; estas cargas adicionales dependerán del diámetro del pistón; mientras más grande sea este diámetro mayor será el efecto de la presión de la línea de flujo en el sistema.

H. Válvula de Contrapresión:

En pozos que tienen exceso de gas se debe instalar un orificio o *pressure back* (válvula de desahogo de presión) en la línea de flujo, lo cual se usa para evitar el cabeceo del pozo o interrupción de la producción. Su función es incrementar la presión en la línea de flujo para evitar que el gas se expanda y cause cabeceo; un incremento de presión en la tubería de 50-60 lpc es generalmente suficiente para detener el cabeceo.

El cabeceo puede ocurrir cuando el fluido producido se acerca a la superficie del pozo y la presión disminuye, esto causa expansión del gas dentro de la tubería de producción empujando el líquido hacia la superficie, pero a medida que el gas fuerza la salida del líquido hacia las líneas de flujo, la presión de la tubería disminuye y más gas podría expandirse.

En un pozo con bombeo el cabeceo es indeseable y debe ser controlado ya que estos causan ciclos de alta producción, seguidos por períodos con poca producción o de ninguna producción; esto ocurre porque al comenzar el cabeceo el gas en expansión empuja el líquido dentro de las líneas de flujo y aumenta la producción momentáneamente, pero el líquido que queda en la tubería es reemplazado por más y más gas libre y eventualmente la tubería queda seca, deteniéndose la producción hasta que la tubería se llene con fluido nuevamente.

Aunque esta válvula mantiene libre de cabeceo al pozo, la misma debe usarse sólo cuando el pozo presenta cabeceo, ya que el sistema con ella debe realizar un trabajo mayor y por ende disminuye la eficiencia del mismo.

2.1.2 Equipos de Subsuelo: ^[3]

Las bombas de subsuelo y las cabillas de succión conforman los equipos de subsuelo.

A. Bombas de Subsuelo:

Las bombas de subsuelo son uno de los componentes principales del sistema de bombeo mecánico y son bombas de desplazamiento positivo del tipo reciprocante; la bomba afecta las cargas en la cabillas y las cargas en todos los componentes y además la vida de la misma afecta la rentabilidad del pozo, si los componentes de la bomba se desgastan, la eficiencia del sistema disminuye.

▪ Funcionamiento de las Bombas de Subsuelo:

Funcionan por diferencias de presión, mediante bolas y asientos; para permitir la entrada y sello de fluidos en ciclos periódicos sincronizados. El pistón tiene una válvula de bola y asiento llamada válvula viajera debido a que viaja hacia arriba y hacia abajo con el pistón; a la entrada del barril de la bomba se encuentra otra válvula denominada válvula fija la cual está fija a la tubería y no se mueve. La acción de las válvulas es esencial para entender el funcionamiento de la bomba de subsuelo.

Para la carrera ascendente, en el momento que el pistón comienza a moverse hacia arriba, la válvula viajera cierra y levanta las cargas del fluido (punto A de la figura 2.5), lo cual genera un vacío en el barril de la bomba que causa la apertura de la válvula fija permitiendo que el fluido proveniente del yacimiento llene la bomba; y las cargas permanecen constantes durante el recorrido ascendente (Desde el punto A hasta el punto B). En el caso de la carrera descendente, al momento de que el pistón comienza a moverse hacia abajo, la válvula fija se cierra y el fluido en el barril de la bomba empuja la válvula viajera haciendo que la misma se abra (punto C), por lo que la válvula viajera se libera de carga de fluido y la presión del mismo se transfiere a la tubería a través de la válvula fija; es decir la válvula viajera no lleva carga de fluido durante la carrera descendente (Desde el punto C al D); luego el ciclo se repite.

Las diferencias de carga entre los puntos A y D o B y C son las cargas del fluido en el pistón. Algunas veces como cuando pozos con alta producción de gas son bombeados, la transferencia de cargas de fluido no es instantánea. La tasa de levantamiento de carga va a depender del estado de la bomba, espaciamento de la bomba, el tipo de fluido que se bombee y si la tubería está o no anclada.

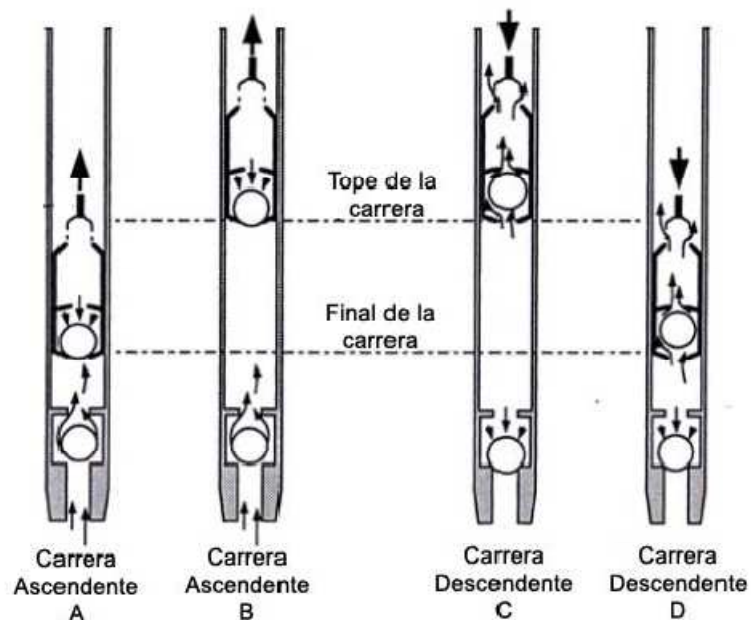


Figura 2.5 Funcionamiento de la bomba de subsuelo. ^[2]

▪ **Principales Elementos de la Bomba de Subsuelo:**

• **Émbolo o Pistón:**

Tiene una resistencia menor a la del cilindro, generalmente es la parte móvil, en él se ubica la válvula viajera que controla la entrada de fluidos de la bomba al interior del pistón.

• **Cilindro o Barril:**

En él se mueve el pistón en sus recorridos ascendentes y descendentes; debe tener un largo considerable para adaptarse a la carrera del pistón.

• **Válvula Fija:**

Controla la entrada de fluidos desde el pozo al interior de la bomba.

• **Válvula Viajera:**

Regula las diferencias de fuerzas sobre ella y por debajo de ella.

▪ **Tipos de Bomba de Subsuelo:**

• **Bombas De Tubería:**

Son bombas que se instalan dentro la tubería y el cilindro es parte integral de las mismas, usualmente son utilizadas para pozos con alta tasa de producción y de poca profundidad (menores a 4500 pies) y donde las condiciones de producción no son tan severas (baja producción de gas y pocos fluidos corrosivos y abrasivos).

Las bombas de tubería son las bombas más fuertes y grandes fabricadas; con este tipo de bombas se pueden usar pistones más grandes que las bombas insertables, la sarta de cabillas puede ser conectada directamente al pistón sin utilizar una cabilla de recuperación. Las bombas de tubería pueden tener válvula fijas removibles o no removibles; si se usa esta última la bomba puede ser muy efectiva en pozos con crudo pesado y bajos niveles de fluido, lo cual ocurre producto de la baja caída de presión a través de las válvulas fijas más grandes.

Usar este tipo de bomba acarrea altos costos debido a que se debe sacar tanto las cabillas como la tubería en los servicios de la bomba; por ello son recomendables para usar solo si una bomba insertable no es lo suficientemente grande para alcanzar la tasa de producción deseada. La figura 2.6 muestra la bomba de tubería.

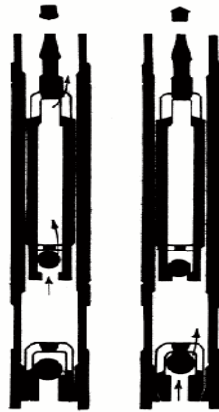


Figura 2.6 Bomba de tubería. ^[1]

- **Bombas Insertable o de Cabilla:**

Se instalan en los pozos con el uso de la sarta de cabillas, no es necesario extraer la tubería; por ello son mas económicas y fáciles de reparar, la base o tope de la bomba (esto depende del tipo de bomba), posee un anclaje que cierra dentro de un niple de asentamiento en la base de la tubería. Luego de que la bomba es asentada es espaciada levantando las cabillas.

Es utilizada en pozos con baja productividad, con profundidades aproximadamente de 7000 pies. Para su anclaje en la tubería se utiliza un mecanismo mecánico a presión y pueden ser ancladas por el fondo, por el tope o por ambos extremos de la bomba.

▪ **Tipos de Bombas Insertables o de Cabilla:**

• **Bombas de Barril Estacionario Anclado en el Fondo:**

Son las más comunes usadas en pozos con bajo nivel de fluido, profundos, pozos con ancla de gas, y pozos con bajo nivel estático. No se deben usar en pozos con problemas de arena o pozos que tienen temporizadores o controladores de bombeo ya que la arena acumulada entre la bomba y la tubería puede atascar la bomba. No son usadas tampoco en pozos que tienen problemas de corrosión porque deben ser tratados con inhibidores químicos y estos no alcanzan el espacio muerto entre las paredes externas de la bomba y la parte baja de la tubería; por lo cual esta área tiene problemas de corrosión.

• **Bombas de Barril Viajero Anclado en el Fondo:**

Son usadas en pozos con problemas de arena o bajo nivel de fluido, en pozos que utilizan temporizadores o controladores de bombeo, debido a que la válvula viajera en el tope del asiento del pistón no permite la entrada de arena al barril cuando el pozo es parado; en pozos que presentan una frecuencia alta de fallas de barril y en pozos con problemas de corrosión, ya que el movimiento del barril mantiene el fluido en movimiento por lo que la arena no se deposita en la bomba atascándola. Pero no son utilizadas en pozos profundos porque el tubo de producción puede explotar bajo las pesadas cargas de fluido que hay en estos pozos.

• **Bombas de Barril Estacionario Anclado en el Tope:**

Se usan en pozos con problemas de arena o bajo nivel de fluido, pozos con gas. Es recomendada antes que la bomba de barril viajera cuando la producción de arena es un gran problema, ya que, como el pozo está anclado en el tope, solo una cantidad pequeña de arena podría acumularse alrededor de la bomba. No son usadas en pozos con golpe del fluido o que son muy profundos porque estas bombas son más susceptibles a partirse que las otras. La figura 2.7 a continuación muestra una bomba d cabillas de anclaje inferior.

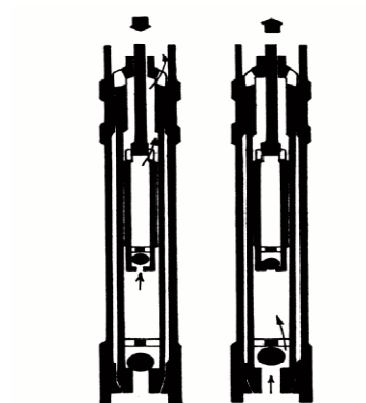


Figura 2.7 Bomba de cabillas de anclaje inferior. ^[1]

- **Bombas de Revestidor:**

Es un tipo especial de bomba insertable y permiten utilizar el revestidor como tubería de producción, por lo que se pueden usar diámetros más grandes para mayores volúmenes de producción. Se conectan en la base de las cabillas cuando se instala.

Una empaadura es utilizada para anclar la bomba al revestidor y proporciona un pack-off entre el barril de la bomba y el revestidor. Son usadas en pozos someros que tienen altas tasas de producción, con bajos cortes de gas porque todo el gas tiene que ir a través de la bomba y su eficiencia volumétrica puede reducirse considerablemente y en pozos que no estén desviados debido a que la fricción entre las cabillas y el revestidor causan fallas frecuentes de cabillas. La figura 2.8 a continuación representa una bomba de revestidor.



Figura 2.8 Bomba de revestidor. ^[1]

▪ **Nomenclatura de las Bombas de Subsuelo:**

API ha desarrollado un método para designar las bombas de subsuelo. En la figura 2.9 se observa un ejemplo.

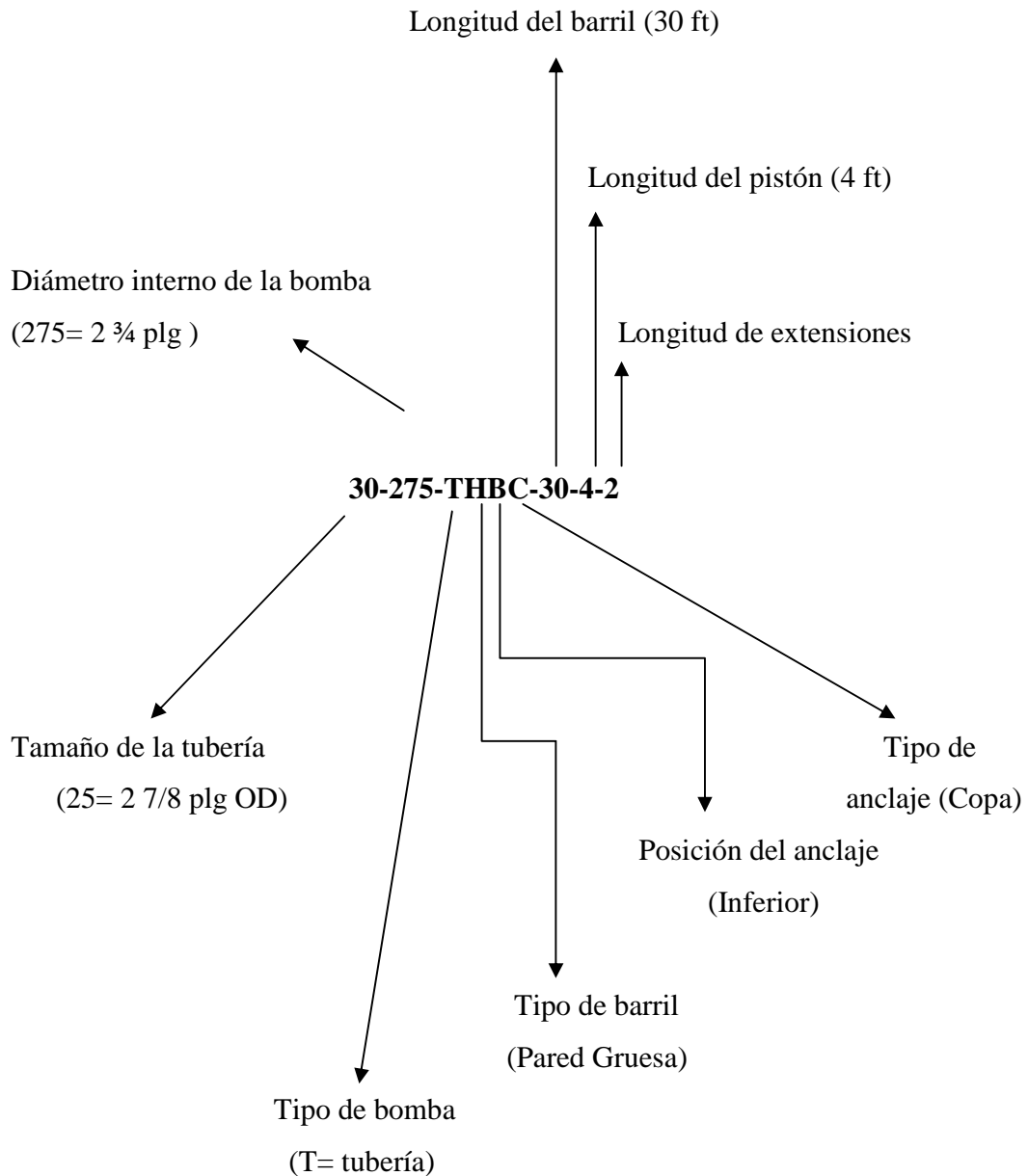


Figura 2.9 Nomenclatura de la bomba. ^[4]

▪ **Criterio de Selección de Bombas de Subsuelo** ^[1]

• **Tipos de Fluidos Bombeados:**

Consideraciones

- Manejo de fluidos viscosos que provocan pérdida por fricción.
- Presiones que originan la producción de altos volúmenes de agua.
- Efectos de flotabilidad de cabillas por manejo de crudos viscosos.
- Efecto drástico sobre las eficiencias de bombeo por manejo de crudos de alta viscosidad.
- Efectos sobre las eficiencias de bombeo al manejar elevados volúmenes de gas libre.
- Presencia de parafinas y otros componentes sólidos que causan atascamiento de válvulas y muestran resistencia al flujo normal.

• **Profundidad de la Arena Productora:**

Consideraciones

- Presiones a la que se somete el barril de la bomba por cargas hidrostáticas de fluido.
- Facilidad y costos de manejo en la reparación.
- Temperaturas de fondo.
- Ubicación óptima de la bomba con mínima pérdida de recorrido del pistón.
- Determinar los esfuerzos a los que serán sometidos los equipos de producción durante el ciclo de bombeo. Esto permitirá la selección de materiales de acuerdo a los esfuerzos de cedencia.
- Tolerancia entre el pistón y el barril de la bomba de subsuelo.

• **Productividad del Pozo:**

Consideraciones

- Determinar la capacidad de bombeo requerida y el tamaño de bomba a instalar.
- Determinar las condiciones de bombeo y los equipos de superficie.
- Ubicación y sumergencia óptima de la bomba de subsuelo.

- **Temperatura del Fluido:**

Consideraciones

- Calidad y composición química de las partes integrantes de las bombas de subsuelo.
- Tolerancia entre el pistón y el barril de la bomba de subsuelo.
- Producción de elevados volúmenes de fluidos, después de la inyección de vapor.

- **Costos del Equipo y Costos del Mantenimiento:**

Consideraciones

- Costos por tipo de bomba (tubería o insertable), para un mismo diámetro de tubería.
- Costos por reparación de los tipos de bombas existentes.
- Costos de servicios al cambiar un tipo por otro.

Otro aspecto necesario a considerar en este criterio, para la selección de una bomba de subsuelo, es su profundidad de colocación en el pozo. En este sentido es recomendable instalar bombas de menor diámetro cuanto mayor sea su profundidad, ya que ésta influye sobre los efectos de cedencia de los materiales que constituyen la bomba.

Los esfuerzos máximos a los que se someten los materiales durante el ciclo de bombeo se estiman mediante el diseño del equipo de producción del pozo. Luego, usando el valor estimado del esfuerzo máximo, se selecciona el tipo de material del cual debe fabricarse la bomba. Esta selección se realiza mediante tablas, de donde también se obtiene el valor del esfuerzo de cedencia mínima del material de fabricación de la bomba. Posteriormente, usando esta información se determina la profundidad máxima de asentamiento de la bomba y para lo cual debe aplicarse el factor de seguridad adecuado.

▪ **Parámetro Necesario para el Diseño de la Bomba:**

• **Eficiencia Volumétrica Ev:**

Se determina mediante la ecuación

$$E_v = q/P_d \quad \text{Ec. 2.1}$$

Donde

Q: tasa actual de producción (bpd)

Pd: desplazamiento de la bomba (bpd)

▪ **Factores que Afectan la Eficiencia Volumétrica:** ^[4]

• **Factores Primarios**

- Diámetro del pistón de la bomba.
- Profundidad de asentamiento de la bomba.
- Sumergencia de la bomba (Presión de entrada a la bomba)
- Tipos de fluidos bombeados.

• **Factores Secundarios**

- Espacio muerto de la bomba.
- Luz del pistón de la bomba.
- Longitud del pistón.
- Desgaste.

▪ **Desplazamiento de la Bomba:**

El desplazamiento teórico total (Pd) o caudal de la bomba se obtiene mediante la ecuación:

$$P_d = (K) * (S_p) * (N) \quad \text{Ec. 2.2}$$

Donde:

K: constante de la bomba

Sp: carrera del pistón de la bomba, (plg/carrera)

N: velocidad de la bomba, (carrera/ min)

$$K = (0,1484) * A_p$$

Ec. 2.3

Donde

A_p: Área de sección del pistón (pulg²)

El desplazamiento de la bomba disminuye con el aumento de la profundidad de la misma, lo cual ocurre por el aumento de los esfuerzos en las cabillas y en la tubería. Por otro lado la eficiencia de bombeo aumenta a medida que aumenta la profundidad de asentamiento de la bomba hasta llegar al punto en el cual la eficiencia disminuye si se sigue aumentando la profundidad de la bomba, esto se debe esencialmente al cambio del gradiente del líquido con la consecuente variación de presión de fondo fluyente. La figura 2.10 representa el desplazamiento de la Bomba vs la profundidad de ubicación de la bomba.

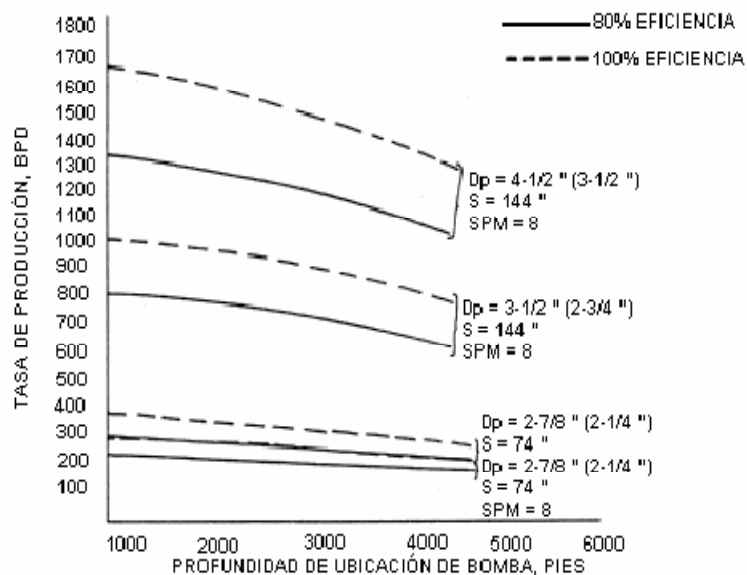


Figura 2.10 Desplazamiento de la Bomba vs Profundidad de ubicación de la bomba.^[4]

La tabla 2.1 muestra las áreas del pistón y la constante de la bomba para los tamaños de pistones más comunes.

Tabla 2.1 Área del pistón y Constante de la bomba. ^[2]

Diámetro del pistón (plg)	Área del pistón (plg ²)	Constante de la bomba (Bpd/plg/spm)
1-1/16	0.887	0.1316
1-1/4	1.227	0.1821
1-1/2	1.767	0.2622
1-5/8	2.074	0.3078
1-3/4	2.405	0.3569
1-25/32	2.490	0.3699
2	3.142	0.4662
2-1/4	3.976	0.5901
2-1/2	4.909	0.7285
2-3/4	5.940	0.8814
3-1/4	8.296	1.2310
3-3/4	11.045	1.6390
4-3/4	17.721	2.6297

B. Sarta de Cabillas de Succión:

Sirven de conexión entre la bomba de subsuelo y la unidad de bombeo que está en superficie, conectan la bomba de subsuelo con la barra pulida. Su función principal es transmitir el movimiento oscilatorio de la barra pulida a la bomba de subsuelo; transfiere la energía y acciona la bomba de subsuelo; también tiene como función soportar las cargas; cada cabilla debe soportar las cargas de fluido y el peso de las cabillas por debajo de ella; por todo esto las cabillas tienen un impacto mayor en el comportamiento del sistema.

Las cabillas son hechas de acero o de fibra de vidrio, generalmente son fabricadas cien por ciento en acero.

- **Tipos de Cabillas de Succión:**

- **Cabillas Convencionales y Cabillas de Fibra de Vidrio:**

Se caracterizan por tener uniones entre cabillas a través de dispositivos mecánicos denominados cuellos.

- **Cabillas Continuas:**

Este tipo de cabilla carece de conexiones entre cabillas.

- **Condiciones para la Selección e Instalación de las Cabillas de Succión:**

Para un tamaño determinado de tubería de producción existen diferentes cabillas que pueden realizar un trabajo efectivo y de ellas se escoge la más liviana, para reducir los esfuerzos sobre la unidad de bombeo.

Pueden ser instaladas en combinaciones de dos y tres tamaño tomando en consideración lo siguiente:

- La profundidad de asentamiento de la bomba.
- El tamaño de la tubería de producción.
- La tasa de producción.
- La unidad de bombeo instalada.
- Las características de los fluidos a ser bombeados.

- **Características Operacionales de las Cabillas de Succión Convencionales:** ^[1]

Este tipo de cabillas son fabricadas en longitudes de 25 a 30 pies unidas por acoples y de estas existen varios tipos que dependen del trabajo que realicen y del material del que fueron realizadas y éstas son:

- **Grado C:**

Este grado presenta como característica una composición de carbón manganeso, recomendada para bombeo de crudos pesados en ambientes no corrosivos, manufacturadas con especificaciones API AISI 1036 modificada con acero al carbón y templada para máxima resistencia a la fatiga.

- **Grado D:**

Presenta una composición níquel-cromo, recomendada para el bombeo de crudos pesados en ambientes corrosivos y en pozos que producen CO₂ manufacturadas en especificaciones API con una aleación especial de acero inoxidable y templado para obtener con excelente balance de resistencia a la fatiga y esfuerzo.

- **Grado K:**

Se caracteriza por tener una composición níquel-molibdeno para el bombeo de crudos pesados en ambientes corrosivos, manufacturadas con especial API AISI 4620 de acero inoxidable para obtener con excelente balance de esfuerzos, dureza y resistencia a la fatiga.

- **Principales Problemas que Presentan la Sarta de Cabillas de Sección:**

Los principales problemas radican en la partidura y el desenrosque de las mismas provocado por estar muy apretadas, por corrosión, por la aplicación de esfuerzos que pasan el límite de la tolerancia, daños ocasionados por manejo, flexión seguida por el enderezamiento lo cual genera esfuerzos de tensión y compresión. La tabla 2.2 a continuación muestra las sarta de cabillas recomendadas por tamaño de bombas y la próxima tabla, tabla 2.3 presenta los pesos y dimensiones de cabillas convencionales y continuas; la tabla siguiente; tabla 2.4 muestra las características de las cabillas de producción.

Tabla 2.2 Sartas de cabillas recomendadas por tamaño de bombas. ^[1]

Prof. Levantamiento Pies	Diam. Cabillas Pulg.	% DE CABILLAS									
		(1) 2 ^{3/8"}		(1) 2 ^{7/8"}		(1) 3 ^{1/2"}		(1) 4 ^{1/2"}			
		(2) 1 ^{1/2"}	(2) 1 ^{3/4"}	(2) 2"	(2) 2 ^{1/4"}	(2) 2 ^{1/4"}	(2) 2 ^{1/2"}	(2) 2 ^{3/4"}	(2) 3 ^{1/4"}	(2) 3 ^{1/2"}	(2) 3 ^{1/4"}
1000	3/4 7/8 1	100,0	100,0	100,0	56,9 43,1	56,9 43,1	51,7 48,3	45,9 54,1	100,0	100,0	40,0 60,0
2000	3/4 7/8 1	100,0	100,0	61,5 38,5	56,9 43,1	56,9 43,1	51,7 48,3	45,9 54,1	100,0	50,0 50,0	40,0 60,0
3000	3/4 7/8 1	69,1 30,9	65,7 34,3	61,5 38,5	56,9 43,1	56,9 43,1	62,8 37,2	59,0 41,0	55,0 45,0	50,0 50,0	40,0 60,0
4000	3/4 7/8 1	69,1 30,9	65,7 34,3	61,5 38,5	56,9 43,1	56,9 43,1	68,3 59,0	59,0 55,0	55,0 50,0	50,0 40,0	40,0
5000	3/4 7/8 1	69,1 30,9	65,7 34,3	61,5 38,5		66,3 33,7	62,8 37,2		50,0 50,0	40,0 60,0	
6000	3/4 7/8 1	69,1 30,9	65,7 34,3	100,0							
(1) DIÁMETRO DE TUBERÍA DE PRODUCCIÓN											
(2) DIÁMETRO DE PISTÓN DE LA BOMBA											

Tabla 2.3 Pesos y dimensiones de cabillas convencionales y continuas. ^[1]

Tamaño (pulg.)	Área (pulg ²)	Cabillas Continuas Peso (lbs/pie)	Cabillas Convencionales Peso (lbs/pie)	Reducción de peso de las continuas con respecto a las convencionales	
				Lbs/pie	%
3/4	0,4418	1,502	1,63	0,13	8
13/16	0,5185	1,763	2,22	0,18	8,2
7/8	0,6013	2,044			
15/16	0,6903	2,347	2,90	0,23	7,9
1	0,7854	2,670			

Tabla 2.4 Características de las cabillas de producción. ^[1]

	Cabillas Convencionales	Cabillas continuas
Sección transversal	Circular	Semi-elíptica
Velocidad de instalación	30 pies en 2 minutos	100 pies en 1 minuto
Conexiones (cuellos-pines)	Cada 25 pies ó 30 metros	Uno en superficie y otro en el fondo
Longitud	25 ó 30 pies	La profundidad del pozo
Forma de entrega	Piezas de 25 ó 30 pies	Enrolladas en carretes de 18 pies de diámetro y capacidad máxima para 12000 pies de cabilla
Diámetros y Pesos	$1^{3/8}$ " 3,422 lbs/pie 1" 2,904 lbs/pie 7/8 " 2,224 lbs/pie 3/4 " 1,634 lbs/pie	$1^{1/16}$ " 3,015 lbs/pie 1 " 2,670 lbs/pie 15/16 " 2,347 lbs/pie 7/8 " 2,044 lbs/pie 13/16 " 1,763 lbs/pie 3/4 " 1,502 lbs/pie

Otros dispositivos de subsuelo son las anclas de gas, los acoples y los centralizadores.

C. Ancla de Gas:

Las anclas de gas son extensiones de bombas, las cuales separan el gas libre del líquido producido antes de que entre en la bomba. La interferencia de gas disminuye la eficiencia de la bomba y trae consigo disminución en las tasas de producción. Estas anclas de gas funcionan con el principio de que el gas es más ligero que el petróleo y por lo tanto se mueve hacia arriba mientras el crudo lo hace hacia abajo.

Existen diferentes tipos de anclas de gas y las más conocidas son: ancla de gas natural, ancla de gas *poor boy* y anclas de gas tipo empacadura. La figura 2.11 representa la forma de un ancla de gas.

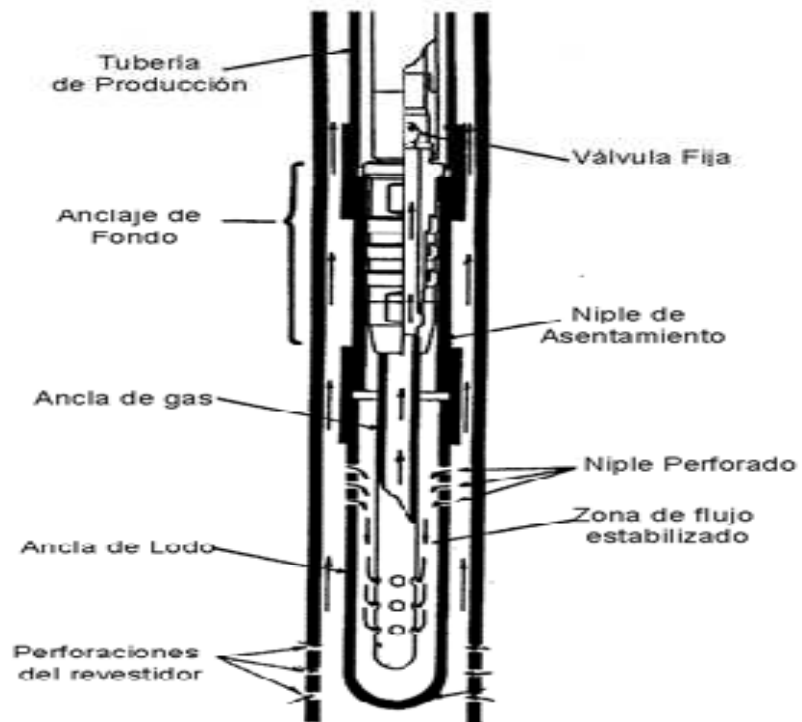


Figura 2.11 Ancla de gas. ^[2]

D. Centralizadores:

Los centralizadores impiden el roce de las cabillas con la tubería de producción y evitan de esta forma el desgaste de uno o de los dos componentes del sistema.

2.2 Análisis de las Condiciones del Sistema de Bombeo Mecánico.^[1]

El análisis del comportamiento de producción de pozos por el método de bombeo mecánico se realiza usando desde un manómetro hasta equipos sofisticados, que incluyen la interpretación de la información analizada. Un equipo que permite, en forma práctica, determinar cualitativa y cuantitativamente el comportamiento de cargas sobre la unidad de bombeo es el dinamómetro.

2.2.1 El Dinamómetro

Es un instrumento que registra las cargas sobre la barra pulida en función de la posición de la barra. El registro que se produce es llamado carta dinagráfica, estas cartas son interpretadas para detectar la mayoría de los problemas del sistema de bombeo mecánico, esta es una herramienta poderosa de diagnóstico que depende de la experiencia del operador. Entre los diferentes tipos de dinamómetros se encuentran:

- **Dinamómetro de la Bomba:** se instala en la parte superior de la bomba y permite determinar cargas con bastante exactitud, ya que no incluye los efectos debidos al movimiento de la sarta de cabillas.

- **Dinamómetro de la Barra Pulida:** se instala en la barra pulida y registra las cargas soportadas por ésta en relación con su comportamiento y presenta una ventaja con respecto al dinamómetro de la bomba, ya que su instalación no requiere el paro de producción del pozo. Entre los dinamómetros de barra pulida se encuentran:

- **Dinamómetro Mecánico:** el cual registra las deflexiones que originan las cargas que soporta la barra pulida, midiéndolas a través de las distorsiones de un anillo de acero cargado en compresión.

- **Dinamómetro Hidráulico:** efectúa la medición mientras el pozo está bombeando, sin necesidad de parar la unidad de bombeo para adaptarlo a la barra pulida. Esta característica lo diferencia del dinamómetro mecánico, el cual requiere del paro de la unidad de bombeo para ser instalado.
- **Dinamómetro Electrónico:** no se instala en la barra pulida sino que por transductores de carga, posición y corriente. Se registra la información de carga desplazamiento y consumo eléctrico en una carta dinagráfica.

2.2.2. Cartas Dinagráficas

Una carta dinagráfica es un registro de cargas versus posición a lo largo de la barra pulida en un instante durante un ciclo de bombeo. Estas permiten mediante el uso de programas computacionales detectar problemas con la bomba de subsuelo, el comportamiento de los equipos de superficie y al mismo tiempo permite mejorar la eficiencia del sistema. La figura 2.12 a continuación es la representación de una carta dinagráfica ideal y muestra la información que se obtiene de una carta dinagráfica con bombeo ideal

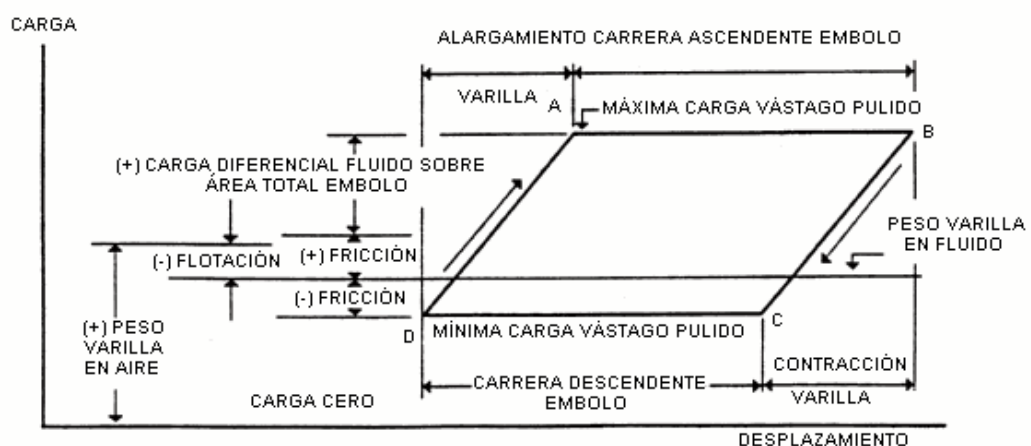


Figura 2.12 Carta dinagráfica ideal. [4]

2.2.3 Interpretación de las Cartas Dinagráficas:

La interpretación de las cartas dinagráficas se puede realizar de manera cualitativa y cuantitativa. El análisis cualitativo se basa en la comparación de la carta dinagráfica de fondo calculada con formas de cartas dinagráficas de superficie conocidas hasta que estas coincidan. Entre los problemas podemos conseguir:

- **Interferencia por Gas**

Como lo indica la figura 2.13 el pistón recorre desde el punto A hasta el punto B sin que la válvula fija abriera, esto nos indica que durante este recorrido no se produjo fluido alguno. Similarmente esto ocurre carrera abajo entre los puntos C y F, en consecuencia esto explica la baja eficiencia del sistema con interferencia por gas.

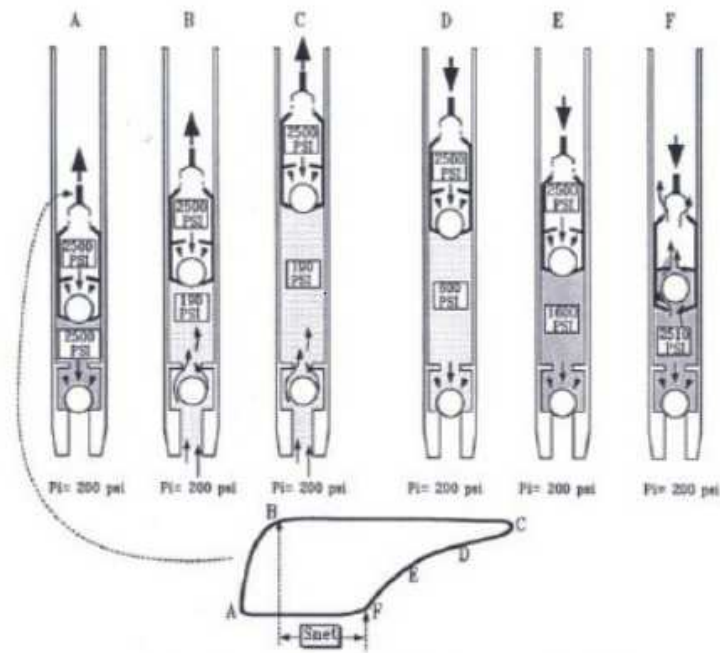


Figura 2.13 Interferencia por gas. [2]

▪ **Golpe de Fluido**

Como lo indica la figura 2.14 el pistón comienza su recorrido ascendente y así mismo se cierra la válvula viajera y se abre la válvula fija, debido a que no existe suficiente fluido para llenar el barril en el momento en que el pistón comience su recorrido descendente se encontrara con gas a baja presión, por lo cual la válvula viajera no se abrirá hasta el momento en que se encuentre con el nivel del fluido, en ese instante toma efecto un impacto producto de la velocidad del recorrido descendente del pistón con el nivel de fluido existente, el cual acarrea muchos problemas asociados a este efecto.

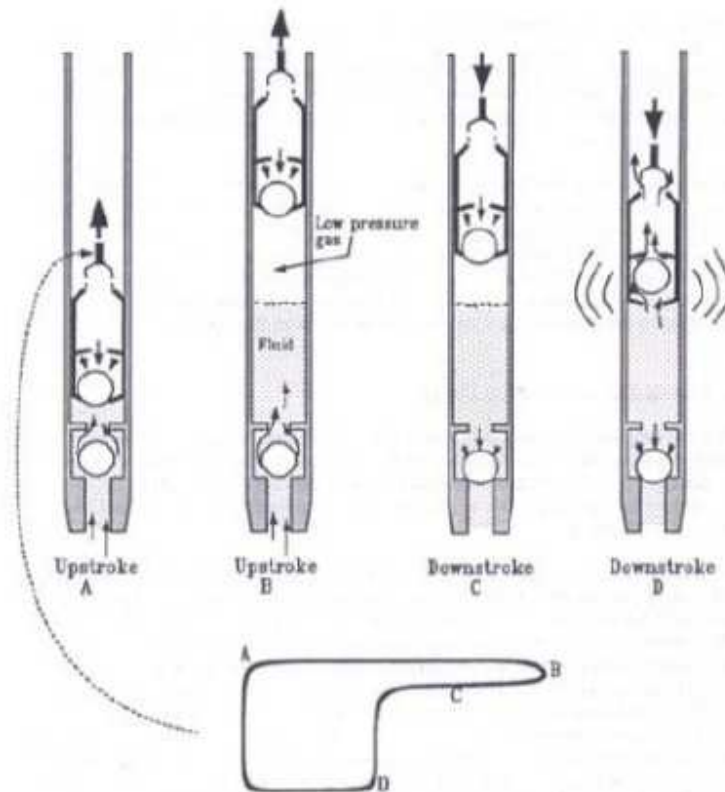


Figura 2.14 Golpe de fluido. [2]

- **Fuga en la Válvula Viajera o el Pistón**

Como lo indica la figura 2.15 el pistón comienza su recorrido ascendente tomando la carga de fluido, pero debido a que existe una fuga en la válvula viajera o en el pistón la misma no es completa. La carga es completa cuando el pistón ha alcanzado su velocidad máxima, lo cual ocurre aproximadamente a la mitad de la carrera ascendente, luego ocurre el mismo efecto ya que dicha velocidad disminuye luego de dicho punto, se puede apreciar que durante la carrera descendente la fuga no tiene ningún efecto ya que la válvula viajera se encuentra abierta.

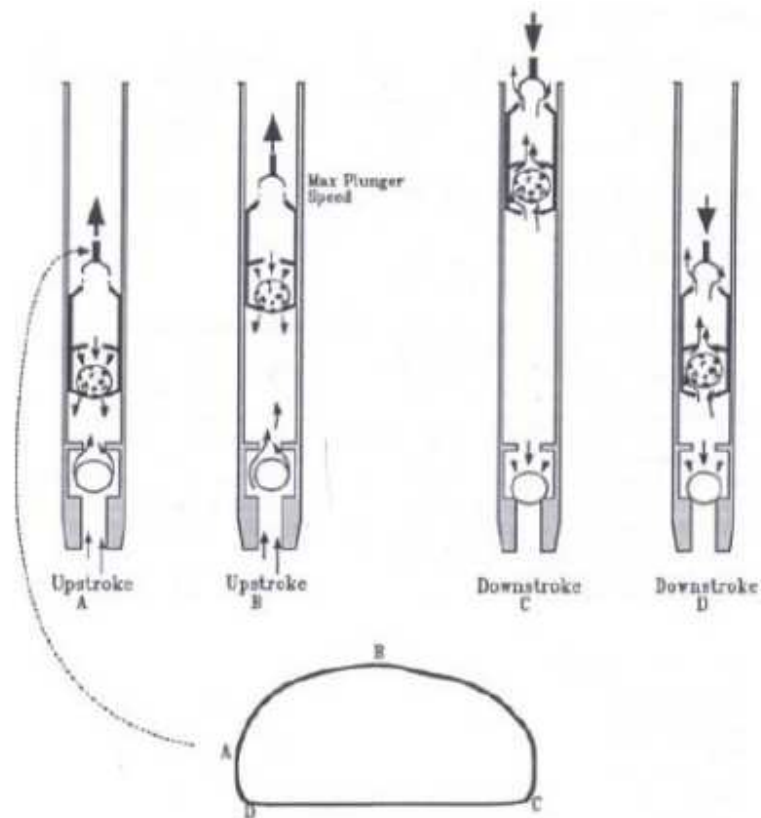


Figura 2.15 Fuga en la válvula viajera o el pistón. ^[2]

- **Fuga en la Válvula Fija**

Como lo indica la figura 2.16 el efecto es similar al explicado anteriormente, solo que el mismo se presenta en la carrera descendiente del pistón.

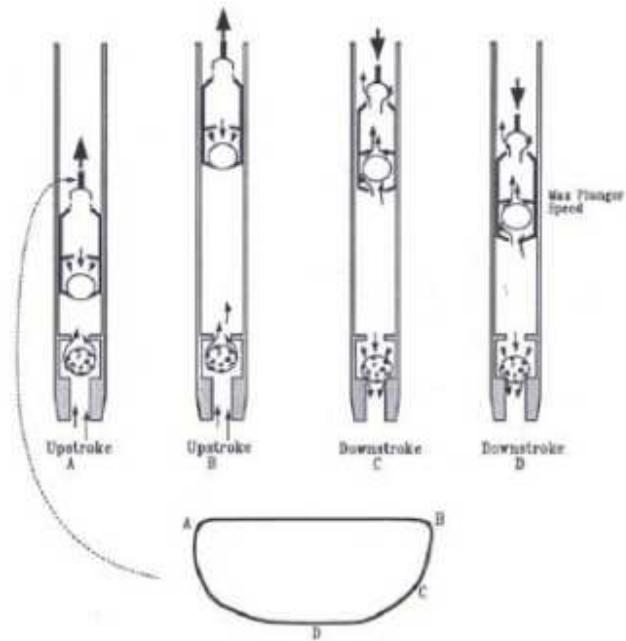


Figura 2.16 Fuga en la válvula fija. [2]

▪ **Ancla de Tubería en Mal Funcionamiento**

Como lo indica la figura 2.17, el pistón comienza su carrera ascendente con normalidad, pero llega un instante de tiempo en el cual el ancla se afloja y asciende a la misma velocidad que lo realiza el pistón de manera que la válvula viajera y fija permanecen cerradas por lo cual no existe producción de fluido, esto ocurre hasta que el pistón logra una mayor velocidad y el proceso de carrera ascendente se estabiliza. El mismo efecto ocurre en la carrera de descenso.

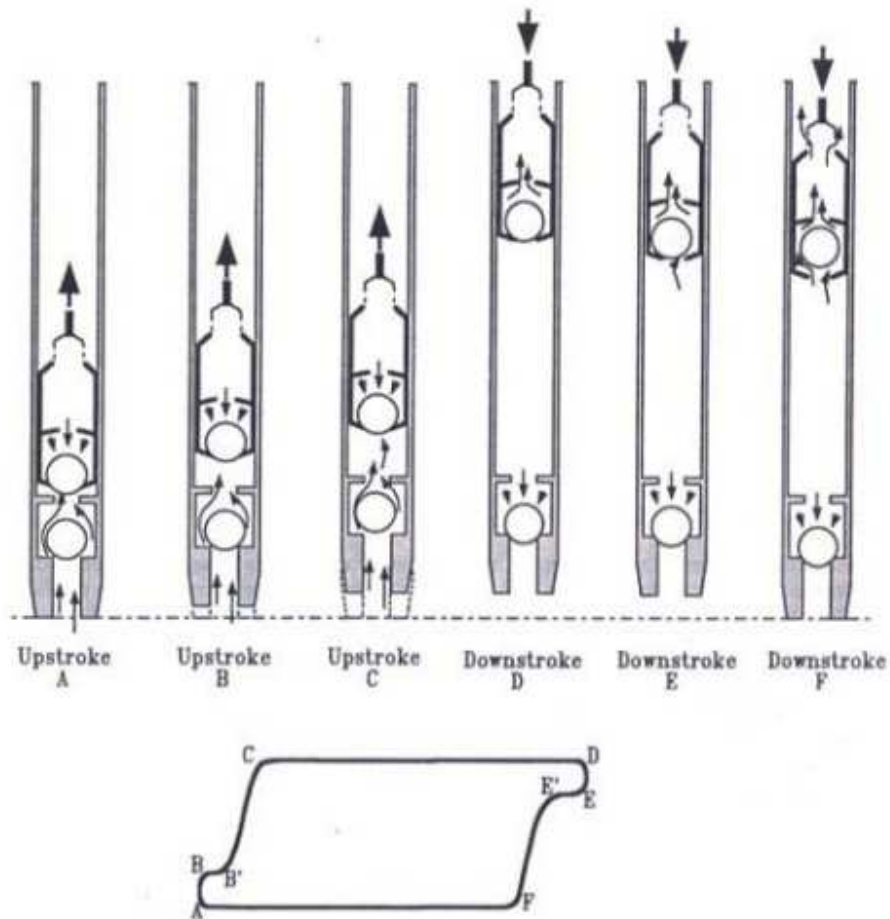


Figura 2.17 Ancla de tubería en mal funcionamiento. [2]

- **Pistón Golpeando Abajo**

Este efecto ocurre cuando el pistón se encuentra espaciado muy debajo de manera que en la carrera descendente ocurre un impacto compresivo como lo indica la figura 2.18 esto ocasiona una reducción en la carga, lo que explica el pico en la carta dinagráfica.

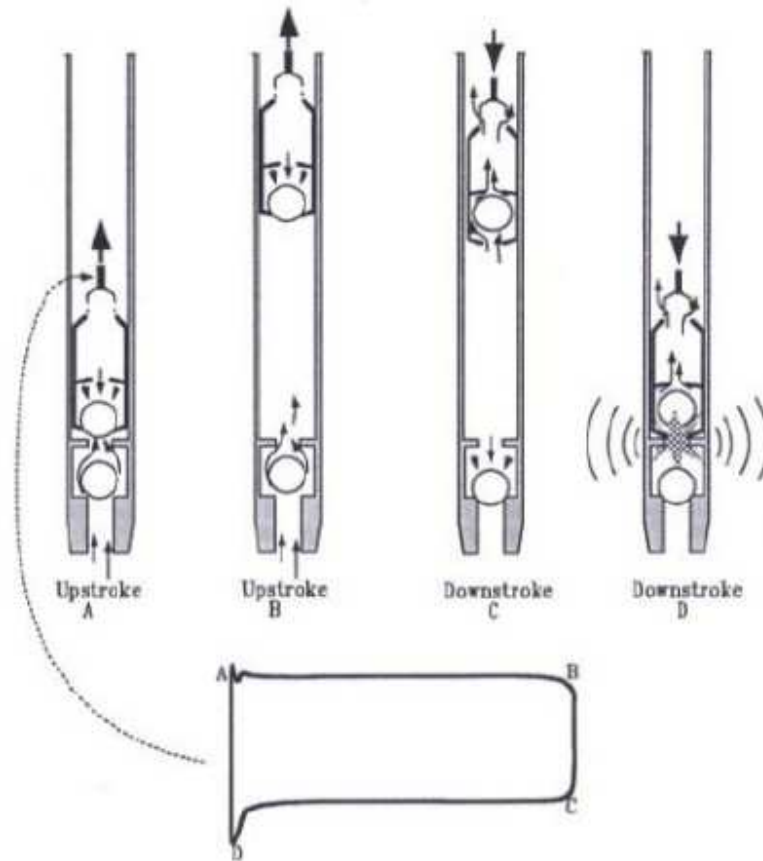


Figura 2.18 Pistón golpeando abajo. [2]

- **Barril de la Bomba Doblado o Pegándose**

Como lo indica la figura 2.19 la carga en el pistón aumenta una vez que el mismo llega a la sección doblada y recupera la estabilidad de cargas una vez que se aleja de la misma, este efecto ocurre tanto en la carrera ascendente como en la carrera descendente.

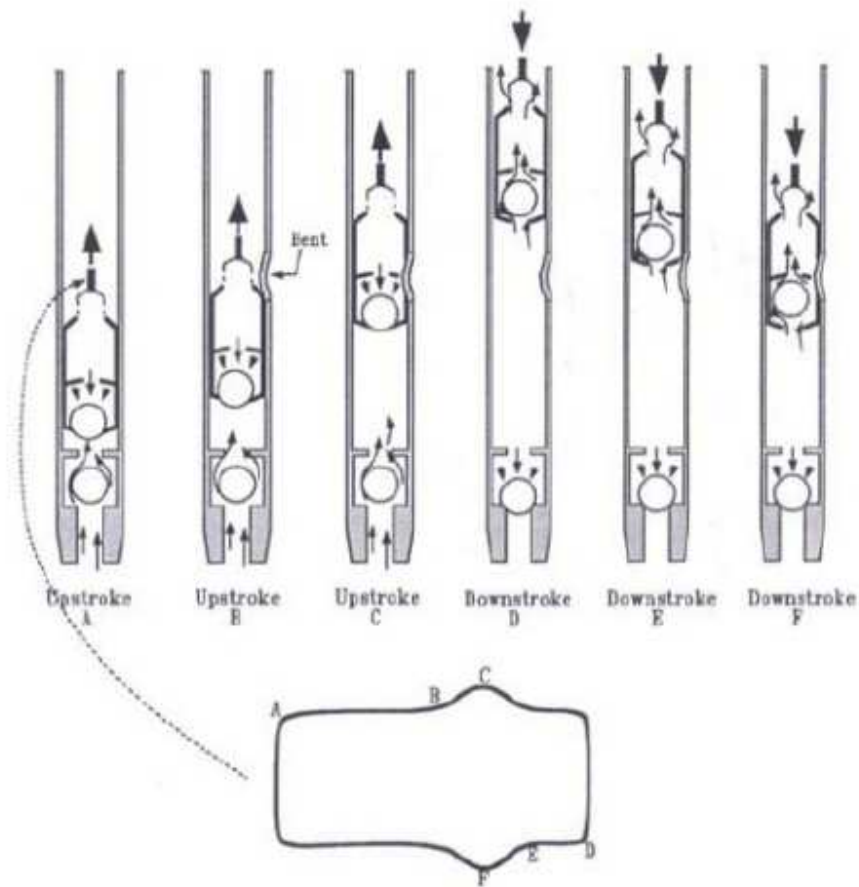


Figura 2.19 Barril de la bomba doblado o pegándose. [2]

- **Barril de la Bomba Gastado o Partido**

Como lo indica la figura 2.20 cuando el pistón está en la carrera ascendente y se encuentra con la zona gastada se experimenta una caída de carga, mientras que durante la carrera descendente no tiene ningún efecto, ya que la válvula viajera se encuentra abierta.

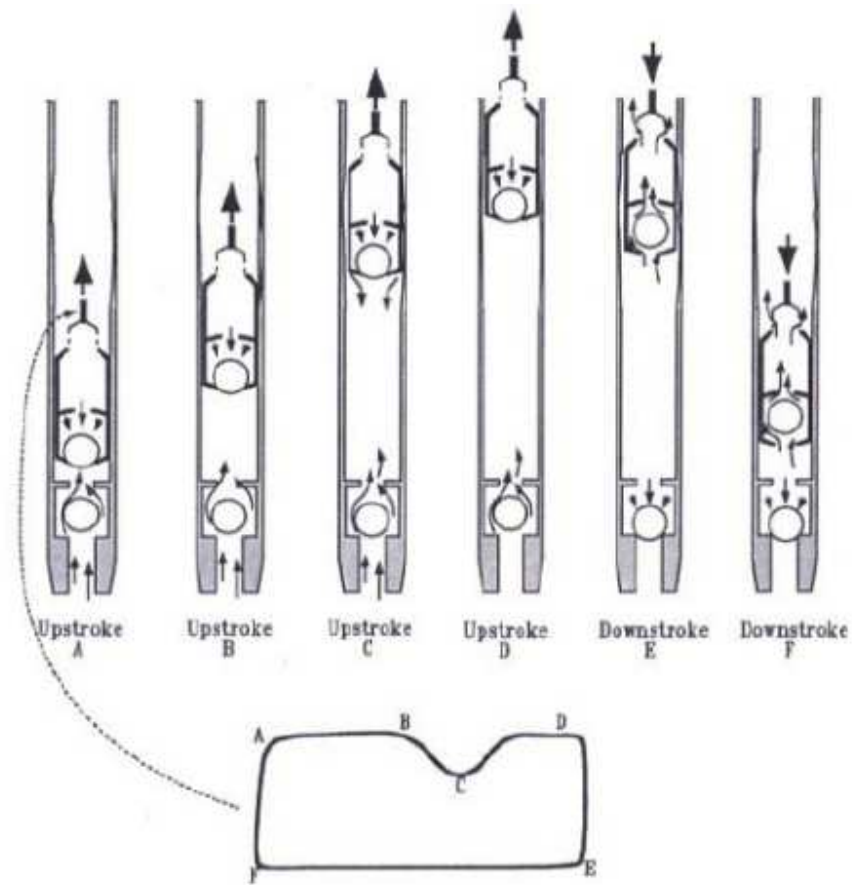


Figura 2.20 Barril de la bomba gastado o partido. [2]

Otros problemas:

La figura 2.21 y la figura 2.22 representan patrones teóricos, los cuales sirven para el operador guiarse al momento de realizar un análisis cualitativo a las cartas dinagráficas y ambas especifican formas de cartas dinagráficas de superficie con el respectivo problema que se presente de acuerdo a cada una de las formas.

CARTA	EXPLICACIÓN
	BOMBA PEGANDO EN LA CARRERA ASCENDENTE SIN SALIR DE LA ZAPATA
	LA ARENA ATASCA O CASI ATASCA EL PISTÓN EN LA BOMBA
	PISTÓN DE LA BOMBA GOLPEANDO EN ARENA
	VÁLVULA FIJA PESCADA EN BOMBA DE TUBERÍA
	EL NIVEL DE FLUIDO COINCIDE CON LA VÁLVULA FIJA
	POZO BOMBEANDO COMPLETO (PUMPING - OFF)
	LÍNEA DE CARGA MOSTRANDO LA VÁLVULA VIAJERA MALA
	LÍNEA DE CARGA MOSTRANDO LA VÁLVULA FIJA MALA
	TUBO DE SUCCIÓN TAPADO POR ARENA
	PISTÓN EROSIONADO O GASTADO. EL FLUIDO ESTA PASANDO ENTRE EL PISTÓN Y LA CAMISA
	ALARGAMIENTO DE LAS CABILLAS DEBIDO A OBSTRUCCIONES EN LA LÍNEA DE FLUJO
	ALARGAMIENTO DE LAS CABILLAS DEBIDO A OBSTRUCCIONES EN LA LÍNEA DE FLUJO

Figura 2.21 Otros problemas. ^[4]



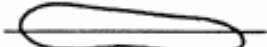









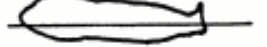
CARTA	EXPLICACIÓN
	BOMBEANDO NORMALMENTE
	BOMBA MANEJANDO MUCHO GAS
	POZO AGITADO. FLUIDO PRODUCIDO CON MUY ALTO RGL. LAS VÁLVULAS VIAJERA Y FIJA PERMANECEN ABIERTAS
	BOMBEO DE CRUDO MUY VISCOSO
	CABILLAS PARTIDAS O DESCONECTADAS
	VÁLVULA VIAJERA DAÑADA
	VÁLVULA FIJA CON FUGAS
	VÁLVULA FIJA CORTADA
	PISTÓN PEGADO
	CAJA DE ENGRANAJE DEL BALANCÍN DAÑADA
	PISTÓN GOLPEADO ABAJO
	PISTÓN GOLPEADO ARRIBA
	BOMBA DE CABILLAS SALIENDOSE DE LA ZAPATA AL FINAL DE CARRERA ASCENDENTE Y REENTRANDO EN LA DESCENDENTE

Figura 2.22 Otros problemas (continuación). [4]

La interpretación cuantitativa proporciona directamente información sobre las cargas que soporta la barra pulida, se basa en cálculos matemáticos mediante los cuales se obtiene:

- Carga máxima sobre la barra pulida.
- Carga mínima sobre la barra pulida.
- Elongación de las cabillas.
- Carga de las cabillas en el fluido.
- Carga de las cabillas en el aire.
- Flotabilidad de las cabillas en el fluido.
- Carga en la válvula viajera.
- Carga en la válvula fija.
- Carga de contrabalance.
- Torque máximo de la unidad de bombeo.
- Variación de torque con el recorrido de la barra pulida.
- Potencia del motor.

2.2.4 Cargas Obtenidas Usando un Dinagrama

Las cargas impuestas a un sistema de bombeo mecánico con cabillas se determinan mediante un dinagrama. El procedimiento se ilustra en la figura 2.21:

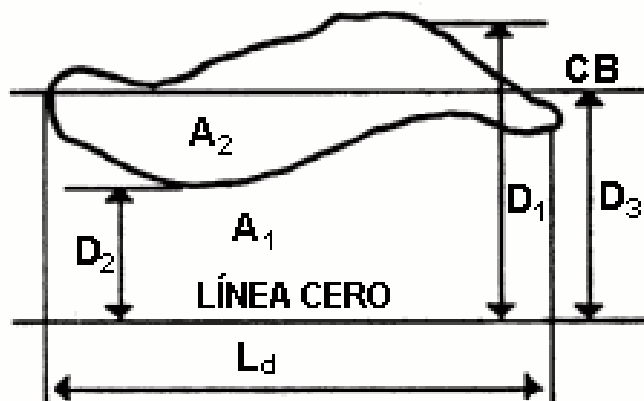


Figura 2.23 Análisis de cargas. ^[5]

De esta figura se obtiene:

- La carga máxima: $C \times D_1$
- La carga mínima: $C \times D_2$
- Rango de carga: $C \times (D_1 - D_2)$
- Carga promedio en la carrera ascendente: $C \times \left(\frac{A_1 + A_2}{L_d} \right)$
- Carga promedio en la carrera descendente: $C \times \left(\frac{A_1}{L_d} \right)$
- Trabajo administrado a la sarta de cabilla en contra de la elevación del fluido y de la fricción por cada carrera: A_2
- Trabajo realizado por la sarta de cabilla en contra de su elevación o caída por cada carrera: A_1

Donde:

C: carga

D1, D2 y D3: leído de la carta dinográfica, figura 2.21

A1 y A2: leído de la carta dinográfica, figura 2.21

Ld: leído de la carta dinográfica, figura 2.21

▪ Efecto de Contrapeso Obtenido de un Dinagrama

El efecto de contrapeso se obtiene de un dinagrama mediante el procedimiento siguiente:

1. La línea de contrapeso (C1B1) se dibuja en el dinagrama, parando la unidad de bombeo en una posición, donde el efecto del contrapeso tenga su valor máximo. Lo cual ocurre cuando la manivela se encuentra en la posición horizontal de la carrera. Esto corresponde a un ángulo $\theta=90^\circ$ en la carrera ascendente y lo cual equivale a un ángulo $\theta=270^\circ$, si se mide en la dirección

de las agujas de un reloj, comenzando las medidas en un ángulo igual a cero, correspondiente a la hora 12 en punto.

2. La contrapesa ideal se obtiene de una manera aproximada, de la ecuación:

$$CB_{IDEAL} = \frac{PPRL + MPRL}{2} \quad Ec. 2.4$$

Donde:

PPRL: Carga Máxima

MPRL. Carga Mínima

3. Por lo tanto, para calcular el efecto de contrapeso se usa la siguiente ecuación:

$$CB_{REAL} = C \times D_3 \quad Ec. 2.5$$

4. El contrapeso correcto se determina de la relación:

$$CB_{CORRECTO} = \left(\frac{1}{2}\right) \times \left(\begin{matrix} \text{carga promedio en la} \\ \text{carrera ascendente} \end{matrix}\right) + \left(\begin{matrix} \text{carga promedio en la} \\ \text{carrera descendente} \end{matrix}\right) \quad Ec. 2.6$$

Si la línea de contrapeso CB no ha sido dibujada, el contrapeso aproximado se determina de la relación:

$$CB_{APROXIMADO} = C \times \left[\frac{A_1 + \left(\frac{A_2}{2}\right)}{L_d} \right] \quad Ec. 2.7$$

▪ **Potencia en la Barra Pulida (PRHP) Obtenida de un Dinagrama**

La potencia en la barra pulida se puede calcular de un dinagrama, usando la siguiente ecuación:

$$PRHP = \frac{C \times \left(\frac{A_2}{L_d} \right) \times S \times N}{12 \times 33000} \quad Ec. 2.8$$

Donde:

S: longitud de la carrera (pulg)

N: velocidad de la bomba (carrera/minutos)

▪ **Calculo de Potencias:**

• **Potencia Hidráulica:**

$$H_H = (7.36 \times 10^{-6}) Q * \gamma * Z \text{ (hp)} \quad Ec. 2.9$$

Dónde

Q = Tasa de producción de la bomba (bbl/d).

γ = Gravedad específica del fluido (Fracción).

Z = nivel del fluido (pie).

$$Q = (\text{Eficiencia}) * Pd \quad Ec. 2.10$$

Donde

Pd = Desplazamiento Teórico.

$$Pd = (K) * (Sp) * (N) \quad Ec. 2.11$$

Donde

K = Constante de la bomba.

Sp = Desplazamiento neto de la bomba (pulg).

N = Velocidad de la bomba (carrera/min).

Sp es un valor leído directamente de cada carta de fondo a estudiar.

$$K = (0.1484) * A_p \quad Ec 2.12$$

$$A_p = \left(\frac{\pi}{4}\right) * D_p^2 \quad Ec 2.13$$

Donde

A_p = Área del pistón (pulg²).

D_p = Diámetro del pistón (pulg).

Mediante la simplificación de las ecuaciones anteriores se tiene que:

$$Q = (0.1484) * (A_p) * (S_p) * (N) * (\text{Eficiencia}). \quad Ec 2.14$$

▪ Cálculo del Torque Instantáneo Usando un Dinagrama

Un método exacto para determinar el torque instantáneo mediante un dinagrama se basa en el método del **factor torque**.

En este método se usan factores de torque y posición de la barra pulida. Las normas API requieren de los fabricantes de las unidades de bombeo con cabillas, la entrega al usuario de los factores de torque y de carrera por cada 15° de posición de la manivela. Los factores de torque se obtienen de la geometría de cada unidad de bombeo en particular.

Por lo tanto, para obtener el torque instantáneo que ocasiona una carga neta específica en una posición dada de la manivela, se hace lo siguiente:

1. Obtener el factor de torque correspondiente a la posición deseada de la manivela, TF.
2. Obtener la carga neta correspondiente de la manivela, W_n .
3. El torque instantáneo, T_{W_n} , esta dado por:

$$T_{W_n} = TF \times W_n \quad \text{Ec.2.15}$$

Donde:

W_n : carga neta (lbf)

W_n : W-B

W: peso total de las cabillas en el aire

B: carga requerida para balancear la unidad de bombeo (puede ser negativa o positiva)

El torque que ocasiona el contrapeso= $M \times \text{Sen}(\theta)$

Donde:

M: momento máximo de la manivela y contrapeso alrededor del eje de la manivela (suplido por el fabricante).

El torque neto en el reductor de la velocidad, T_{NETO} , es igual a la diferencia entre el torque debido a la carga del pozo y el torque debido a la rotación del contrapeso:

$$T_{NETO} = \overline{TF} \times (W - B) - M \times \sin(\theta) \quad \text{Ec.2.16}$$

Donde:

TF: factor de torque promedio

2.2.5 Factores que Modifican la Forma de un Dinagrama. ^[1]:

- **Unidad de Superficie:**

Tener en cuenta las unidades de superficie para estudiar la forma de una carta dinográfica es importante ya que estas unidades tienen el propósito de accionar a la sarta de cabillas y posteriormente a la bomba de subsuelo. Las unidades de unitorque poseen un diseño geométrico avanzado, el cual permite reducir los efectos de carga sobre los extremos, distribuir las cargas en forma más eficiente que una unidad convencional y por lo tanto se reducen los esfuerzos de torsión o torque sobre la unidad.

Las unidades hidráulicas Hydrowell son otro tipo de unidades, en ellas no se aplica el efecto de torque; además la longitud de la carrera es generalmente mayor que las obtenidas con unidades de balancín, por lo tanto se logra la misma producción con menor velocidad de bombeo. La velocidad de bombeo está limitada en su carrera ascendente por el caudal de la bomba hidráulica. La carrera descendente depende fundamentalmente del peso de las cabillas, por lo tanto para crudos muy viscosos las velocidades de bombeo son bajas y los requerimientos de presión muy altos. En este caso los caudales requeridos por la bomba son bajos.

- **Vibraciones de las Cabillas:**

Este factor es importante a la hora de interpretar la carta, esto ocurre por cambios bruscos en la barra pulida durante la carrera ascendente (cierre de la válvula viajera) y el golpeteo de fluido.

- **Viscosidad del Petróleo:**

La viscosidad afecta muchísimo la forma de la carta, ya que la misma proporciona la carga a la cual va a estar sometida la bomba de subsuelo, además la alta viscosidad limita la velocidad de bombeo al oponerse a la fuerza gravitatoria que permita que la sarta descienda, lo cual impide alcanzar la producción máxima del pozo.

- **Sumergencia de la Bomba:**

La sumergencia de la bomba es la distancia en pies entre la profundidad de la bomba y el nivel de líquido en el anular, proporciona la fuerza necesaria para abrir la válvula fija y poder llenar el barril. La sumergencia tiene efectos sobre la tasa de producción.

- **Presión a la Entrada de la Bomba:**

Este factor es muy importante ya que para obtener la máxima eficiencia de la bomba, se debería trabajar con la mínima presión a la entrada, esta debe exceder al punto de burbujeo del fluido más la caída de presión que sucede durante el bombeo.

Otras fuerzas que actúan en la sarta de cabillas y en la bomba, además de la carga de fluido estático son: Interacción fluido- cabilla, fricción entre la cabilla y el eductor, interacción entre la bomba y el fluido y efectos inerciales.

La figura 2.22 muestra el máximo recorrido del pistón (MPT), la carga de fluido (F_o) y la longitud de la carrera cuando la carga total está actuando sobre la válvula fija (EPT).

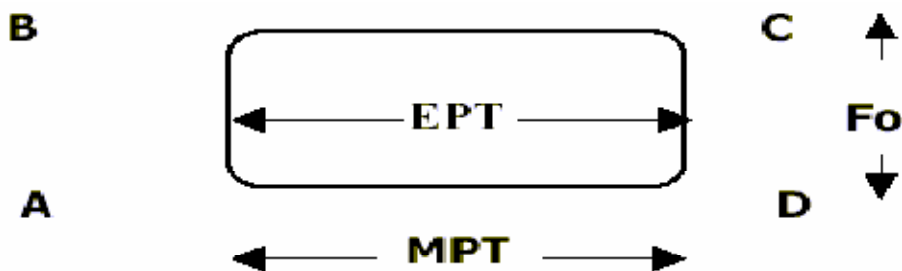


Figura 2.22 Máxima carrera del pistón. ^[5]

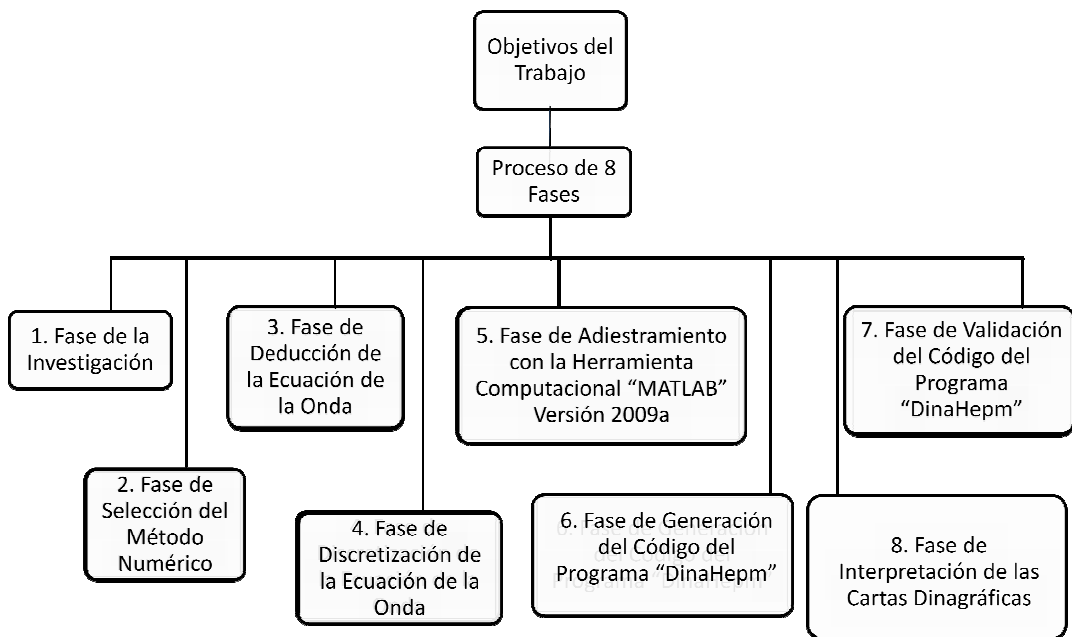
Los sucesivos pasos del recorrido son:

- 1- Empieza la carrera ascendente (punta A), válvula viajera cerrada.
- 2- De A hacia B, la carga de fluido es levantada por las cabillas.
- 3- La válvula fija se abre en B, el fluido entra a la bomba cuando la presión en la bomba cae cerca a la presión de la entrada de la bomba.
- 4- De B a C las cabillas soportan las cargas de fluido.
- 5- En C, la válvula fija cierra, el pistón empieza a bajar, la válvula viajera se mantiene cerrada.
- 6- De C a D si presenta gas, ésta se comprime y la carga de fluido es transferida de la cabilla al eductor.
- 7- En D, la presión de descarga de la bomba es igual a la presión estática del eductor y la válvula viajera se abre.
- 8- Del punto D hacia el punto A, el fluido se desplaza a través del eductor, cuando la válvula fija está cerrada y comienza un nuevo ciclo.

CAPITULO III

METODOLOGÍA

Se tomó como base los objetivos del trabajo para la elaboración de la metodología; con el fin de cumplir los mismos. Se realizó una extensa investigación en distintas fuentes sobre el mecanismo de producción de bombeo mecánico, las cartas dinográficas y su interpretación para encontrar problemas en el sistema. En esta investigación se incluye la búsqueda de la ecuación de onda y del método más eficiente para su solución; y así se establecieron las siguientes fases que caracterizan todo el proceso para la elaboración del presente Trabajo Especial de Grado.



3.1 Fase de Investigación:

Esta fase incluye la búsqueda exhaustiva de información, la cual se realizó con el fin de caracterizar y comprender el mecanismo de producción de bombeo mecánico a fondo, a través del estudio de los componentes y funcionamiento de dicho sistema de

producción; además de ello se investigó todo lo referente a las cartas dinagráficas, incluyendo las diferentes representaciones de las mismas que dependiendo de su interpretación infieren un problema determinado del sistema. Se hizo uso de material bibliográfico para este fin como son los libros de texto que abarcan dichos temas y de los artículos técnicos. En esta fase; igualmente por los medios ya nombrados se investigó la ecuación de onda y se seleccionó el método más idóneo para su solución, denominado método de diferencias finitas.

3.2 Fase de Selección del Método Numérico: ^[6]

En esta fase se contó con la colaboración de profesionales matemáticos por medio de los cuales se obtuvo mejor orientación en cuanto a la selección del método de solución de la ecuación de onda.

La ecuación de onda es una ecuación diferencial hiperbólica lineal que describe las vibraciones longitudinales de la cabilla y con ella puede describirse el movimiento de la misma, el método numérico seleccionado para resolver dicha ecuación, es el método de diferencias finitas, el cual es históricamente el primer método desarrollado para discretizar ecuaciones diferenciales. En el dominio donde se busca la solución de un problema diferencial parcial se introduce una malla (regular o no regular) y cada función del problema se aproxima por un conjunto de sus valores en los puntos de la malla, llamado función discreta. Una función discreta también puede considerarse como un vector. Todas las derivadas del problema también se aproximan en los puntos de la malla usando fórmulas de diferenciación numérica. Como resultado, cada ecuación diferencial se cambia por un sistema de ecuaciones discretas obtenidas en cada punto de la malla.

El método de diferencias finitas realiza la sustitución de las derivadas en la ecuación diferencial con aproximaciones de diferencias finitas; de esto se obtiene un sistema algebraico de ecuaciones largo pero finito en lugar de ecuaciones diferenciales.

La fórmula de diferenciación numérica emerge directamente de la definición del límite:

$$f'(x) \approx \frac{f(x+h) - f(x)}{h} \quad \text{Ec. 3.1}$$

Para una función lineal $f(x) = ax + b$ la fórmula aproximada (Ecuación 3.1) es exacta, es decir se produce el valor correcto de $f'(x)$ para cualquier valor de h distinto de cero. La fórmula puede ser exacta en otros casos también, pero solo fortuitamente. Para evaluar el error envuelto en esta fórmula de diferenciación numérica; el punto de inicio es el teorema de Taylor en esta forma:

$$f(x+h) = f(x) + hf'(x) + \frac{h^2}{2} f''(\xi) \quad \text{Ec. 3.2}$$

ξ es un punto en el intervalo abierto entre x y $x+h$. Para la validez de la Ecuación 3.2 f y f' deberían ser continuas en el intervalo cerrado entre x y $x+h$, y f'' debería existir en el intervalo abierto correspondiente. Un rearrreglo de la Ecuación 3.2 produce:

$$f'(x) \approx \frac{f(x+h) - f(x)}{h} - \frac{h}{2} f''(\xi) \quad \text{Ec. 3.3}$$

La ecuación 3.3 es más útil que la ecuación 3.1, el término del error en la ecuación 3.3 tiene dos partes; una potencia de h y un factor que envuelve una derivada de f de mayor orden, el término h hace a la expresión converger a cero como h se aproxima a cero. La rapidez de la convergencia depende de la potencia de h . Estas observaciones aplican a muchas estimaciones de error en el análisis numérico.

El término $\frac{h^2}{2} f''(\xi)$ en la ecuación 3.3 es llamado error de truncamiento, es el error que surge, porque en algún punto en la derivación una serie de Taylor ha sido truncada. En este caso, la ecuación 3.1 aproximada fue obtenida truncando la serie:

$$f(x + h) = f(x) + hf'(x) + \frac{h^2}{2} f''(x) + \frac{h^3}{3!} f'''(x) + \dots \quad \text{Ec. 3.4}$$

La diferenciación numérica tiene su aplicación más importante en la solución numérica de ecuaciones diferenciales. Un artificio común es reemplazar derivadas por aproximaciones tales como la de la Ecuación 3.1, la precisión de la fórmula de diferenciación numérica depende de la potencia de h presente en el término del error. Una formula superior es:

$$f'(x) \approx \frac{f(x + h) - f(x - h)}{2h} \quad \text{Ec. 3.4}$$

Esto se deriva de dos casos del teorema de Taylor,

$$f(x + h) = f(x) + hf'(x) + \frac{h^2}{2} f''(x) + \frac{h^3}{6} f'''(\xi_1) \quad \text{Ec. 3.5}$$

$$f(x - h) = f(x) - hf'(x) + \frac{h^2}{2} f''(x) - \frac{h^3}{6} f'''(\xi_2) \quad \text{Ec. 3.6}$$

Restando ambas ecuaciones se obtiene que:

$$f'(x) \approx \frac{f(x + h) - f(x - h)}{2h} - \frac{h^2}{12} [f'''(\xi_1) - f'''(\xi_2)] \quad \text{Ec. 3.7}$$

Este es un resultado más favorable por el término h^2 en el error; este término del error es aplicable si f''' existe. El término del error en la ecuación 3.7 puede ser simplificado si se asume que la función f''' es continua en $[x - h, x + h]$. Se denotará M como el mayor valor y m como el menor valor de f''' en el intervalo $[x - h, x + h]$. Entonces $f'''(\xi_1)$, $f'''(\xi_2)$ y $c \equiv \frac{[f'''(\xi_1) + f'''(\xi_2)]}{2}$ están en el intervalo $[m, M]$. Si f''' es continua, asume el valor c en algún punto ξ en $[x - h, x + h]$, por lo tanto

$f'''(\xi) = \frac{[f'''(\xi_1) + f'''(\xi_2)]}{2}$; Cuando esta expresión es sustituida en la ecuación 3.7 resulta:

$$f'(x) \approx \frac{f(x+h) - f(x-h)}{2h} - \frac{h^2}{6} f'''(\xi) \quad \text{Ec. 3.8}$$

Una fórmula importante para segundas derivadas se obtiene extendiendo las ecuaciones (3.5) y (3.6) para un término más y luego sumando dichas ecuaciones. Después de arreglar y aplicar el método usado previamente, se tiene:

$$f''(x) \approx \frac{f(x+h) - 2f(x) + f(x-h)}{h^2} - \frac{h^2}{12} f^{(4)}(\xi) \quad \text{Ec. 3.9}$$

$\xi \in [x-h, x+h]$; esta fórmula es usada frecuentemente en la solución numérica de ecuaciones diferenciales de segundo orden.

3.3 Fase de Deducción de la Ecuación de Onda: ^[7]

Para los investigadores del tema el sistema de bombeo mecánico es modelado matemáticamente como un problema de condiciones de borde, para el desarrollo de este problema se realiza un balance dinámico de fuerzas en un elemento Δx de la sección de la barra obteniendo así la siguiente ecuación:

$$\left[\left(EA_r \frac{\partial u}{\partial x} \right)_+ - \left(EA_r \frac{\partial u}{\partial x} \right)_- \right] - F_D = \frac{\Delta x}{2g_c} [(\rho A_r)_+ + (\rho A_r)_-] \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \quad \text{Ec. 3.10}$$

En la ecuación 3.10 el + y el - representan los valores por encima y por debajo del nodo en estudio a lo largo del elemento Δx de la barra. También se puede notar que la ecuación tiene tres términos, el del lado izquierdo representa las fuerzas tensiles aplicadas a lo largo del elemento Δx , F_D representa la fuerza de amortiguación y mientras que el lado derecho de la ecuación representa la fuerza resultante de la aceleración del elemento.

El término de amortiguación es una compleja combinación de fuerzas que se oponen al movimiento de la barra y los investigadores lo definieron de la siguiente manera:

$$F_D = \frac{\pi a v}{2Lg_c} \left[\frac{(\rho A_r)_+ + (\rho A_r)_-}{2} \right] \Delta x \frac{\partial u}{\partial t} \quad \text{Ec. 3.11}$$

Sustituyendo la Ec.3.11 en la Ec.3.10 y dividiendo por Δx se obtiene:

$$\frac{\left(EA_r \frac{\partial u}{\partial x}\right)_+ - \left(EA_r \frac{\partial u}{\partial x}\right)_-}{\Delta x} - \frac{\pi a v}{2Lg_c} (\overline{\rho A_r}) \frac{\partial u}{\partial t} = \frac{1}{g_c} (\overline{\rho A_r}) \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \quad Ec. 3.12$$

Donde;

$$(\overline{\rho A_r}) = \frac{1}{2} [(\rho A_r)_+ + (\rho A_r)_-] \quad Ec. 3.13$$

Si se toma el límite cuando $\Delta x \rightarrow 0$ se tiene como resultado la ecuación de onda unidimensional con amortiguamiento. Esta ecuación puede ser simplificada para casos de propiedades constantes de la barra.

$$a^2 \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = c \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \quad Ec. 3.14$$

Donde;

$$a^2 = 144 \frac{Eg_c}{\rho} \quad Ec 3.15$$

a= Velocidad del sonido, pie/seg

A_r =Área transversal de la barra, pie²

C=Coficiente de amortiguación, seg⁻¹

E=Modulo de Young, lbf/pie²

F_D =Fuerza de amortiguación, lbf

g_c =Constante de conversión de unidades=32.2(lbm/lbf)(pie/seg²)

L= Longitud de la barra, pie

t=Tiempo, seg

u=Desplazamiento a lo largo de la barra, pie

x=Posición en la barra, pie

ρ =Densidad de la barra, lbf/pie³

v=factor de amortiguación, unidimensional.

3.4 Fase de Discretización de la Ecuación de Onda por el Método de Diferencias

Finitas: ^[8]

Diferentes métodos numéricos podrían utilizarse para resolver la ecuación de onda, después de realizar consultas bibliográficas y ser orientados por expertos en el tema, se dedujo que el método más factible es el método de diferencias finitas, las aproximaciones de las series de Taylor son usadas para generar el método de diferencias finitas para las derivadas de desplazamiento que aparecen en la ecuación de onda; basado en ello la discretización de la ecuación es la siguiente:

$$EA \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = \frac{\rho A}{144g_c} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} + c \frac{\rho A}{144g_c} \frac{\partial u}{\partial t} \quad Ec. 3.16$$

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \frac{\rho A}{144g_c} + \frac{\rho A}{144g_c} c \frac{\partial u}{\partial t} = EA \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \quad Ec. 3.17$$

El subíndice i denota la distancia axial y el subíndice j denota al tiempo.

$$\frac{\partial u}{\partial t} \Big|_{i,j} = \frac{U_{i,j+1} - U_{i,j}}{\Delta t} \quad Ec. 3.18$$

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \Big|_{i,j} = \frac{U_{i,j+1} - 2U_{i,j} + U_{i,j-1}}{\Delta t^2} \quad Ec. 3.19$$

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \Big|_{i,j} = \frac{U_{i+1,j} - 2U_{i,j} + U_{i-1,j}}{\Delta x^2} \quad Ec. 3.20$$

Sustituyendo las ecuaciones 3.16, 3.17 y 3.18 en la ecuación 3.15 se tiene:

$$\begin{aligned} \frac{U_{i,j+1} - 2U_{i,j} + U_{i,j-1}}{\Delta t^2} \left(\frac{\rho A}{144g_c} \right) + \left(\frac{\rho A}{144g_c} \right) c \frac{U_{i,j+1} - U_{i,j}}{\Delta t} \\ = \frac{(EA)U_{i+1,j} - 2U_{i,j} + U_{i-1,j}}{\Delta x^2} \end{aligned} \quad Ec 3.21$$

Se despeja $U_{i+1,j}$ para darle forma a la ecuación final a utilizar.

$$\begin{aligned} U_{i+1,j} = \frac{\Delta x^2}{EA} \left(\frac{U_{i,j+1} - 2U_{i,j} + U_{i,j-1}}{\Delta t^2} \frac{\rho A}{144g_c} + \frac{\rho A}{144g_c} c \frac{U_{i,j+1} - U_{i,j}}{\Delta t} \right) + \\ + 2U_{i,j} - U_{i-1,j} \end{aligned} \quad Ec 3.22$$

Se reagrupan los coeficientes por términos.

$$\begin{aligned} U_{i+1,j} = \left(\frac{\rho A}{144g_c} \frac{\Delta x^2}{EA\Delta t^2} + \frac{\Delta x^2 \rho A c}{EA 144g_c \Delta t} \right) U_{i,j+1} - 2 + 2 \frac{\Delta x^2 \rho A}{EA 144g_c \Delta t^2} \\ + \frac{\Delta x^2 c \rho A}{EA \Delta t 144g_c} U_{i,j} + \frac{\Delta x^2 \rho A}{EA 144g_c \Delta t^2} U_{i,j-1} \\ - U_{i-1,j} \end{aligned} \quad Ec 3.23$$

Y finalmente al simplificar se obtiene la ecuación a utilizar.

$$\begin{aligned} U_{i+1,j} = \left(\left(\frac{\Delta x^2}{EA} \right) \left(\frac{1 + c\Delta t}{\Delta t^2} \right) \frac{\rho A}{144g_c} \right) U_{i,j+1} - \left((2 + c\Delta t) \frac{\Delta x^2}{\Delta t^2} \frac{\rho A}{144g_c EA} - 2 \right) U_{i,j} \\ + \left(\frac{\Delta x^2}{EA \Delta t^2} \left(\frac{\rho A}{144g_c} \right) \right) U_{i,j-1} - U_{i-1,j} \end{aligned} \quad Ec 3.23$$

Para la generación del código del programa se hizo uso de la ecuación (3.22) tomando en cuenta las siguientes condiciones de borde:

- **Condiciones de Borde de Superficie:**

Las condiciones de frontera en superficie son dos; $U_{o,j}$ se obtiene de los datos de desplazamientos proveniente directamente de la representación de esfuerzos vs desplazamientos, la cual es la carta dinográfica de superficie y $U_{1,j}$ obtenido mediante la siguiente ecuación:

La siguiente figura 3.2 ilustra de manera sencilla la generación de cada uno de los desplazamientos en la malla.

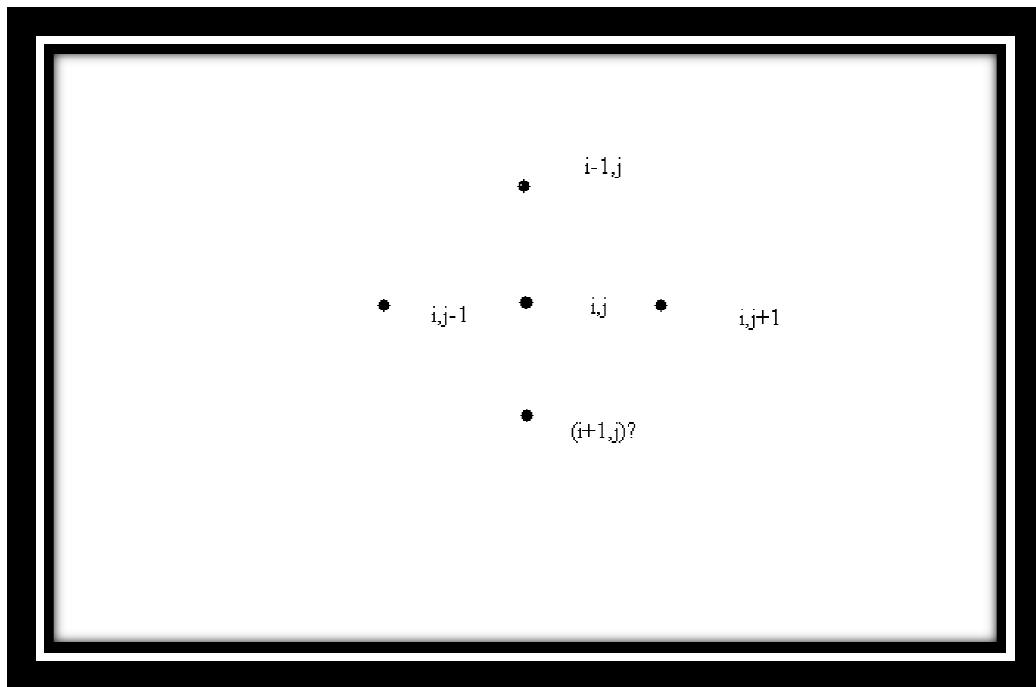


Figura 3.2 Generación de desplazamientos en la malla

3.5 Fase de Adiestramiento con la Herramienta Computacional “MATLAB” Versión 2009a:

En esta etapa de la investigación se escogió la herramienta computacional “*MATLAB*” versión 2009a, para desarrollar el código del programa DinaHEPM, fue seleccionado ya que el mismo se ajusta a las necesidades para realizar el código pertinente y además es un lenguaje completo de fácil acceso que permite realizar cálculos numéricos a través de vectores y matrices; igualmente es capaz de trabajar con variables escalares (matrices de una dimensión) y cadenas de caracteres, con esta herramienta también pueden realizarse gráficos en dos y tres dimensiones. Luego de

que se seleccionó la herramienta se prosiguió a practicar con la misma con el fin de aprender a manejarla adecuadamente, y optimizar el proceso de generación del código del programa DinaHEPM, esto incluyó la revisión de distintos manuales de MATLAB que explicaban su funcionamiento y el uso de los comandos e igualmente se aplicaron códigos cortos de manera de poder conocer los comandos, sus funciones y aprender a manipularlos y luego se aplicaron códigos más extensos o más complejos para adquirir más seguridad en el manejo de la herramienta, todos estos códigos se obtuvieron de los manuales mencionados.

3.6 Fase Generación del Código del Programa:

Para esta fase se contó con la orientación de profesionales matemáticos, de computación y expertos en bombeo mecánico. El código para la generación de las cartas dinagráficas de fondo se basó en el procedimiento descrito en el artículo técnico de la SPE “*An Improved Finite-Difference Calculation of Downhole Dynamometer Cards for Sucker-Rod Pumps*”; y en la solución de la ecuación de onda que en conjunto con los métodos matemáticos adecuados, dió como resultado la obtención de la carta dinagráfica de fondo. Este código se encuentra plasmado en el Apéndice A del presente Trabajo Especial de Grado.

Se utilizó el método de diferencias finitas para la obtención de cartas dinagráficas de fondo para casos de diámetros constantes de la cabilla.

3.7 Fase de Validación del Código del Programa DinaHEPM:

Esta fase consiste en la certificación de la validez del programa realizado, para ello se utilizaron dos casos propuestos en el artículo técnico de la SPE “*An Improved Finite-Difference Calculation of Downhole Dynamometer Cards for Sucker-Rod Pumps*” donde se señalan los respectivos datos de cada caso, incluyendo la carta dinagráfica de superficie, datos de la unidad de bombeo y datos del pozo.

Ambos casos utilizados para validar el programa, poseen una sarta de cabilla de diámetro constante, y cada caso tiene diferente longitud de la sarta de cabillas de producción y diferente velocidad de la bomba.

Antes de introducir los datos requeridos por el programa para generar la carta dinográfica de fondo, se prosiguió a digitalizar la representación de la carta dinográfica de superficie para obtener los datos de esfuerzo y desplazamiento que son necesarios y pedidos como dato por el programa para que este pueda funcionar, luego de tener todos los datos completos se pudo validar el buen funcionamiento del programa con ambos casos.

A partir de la generación de cada carta dinográfica de fondo se interpretaron las mismas para deducir fallas o problemas existentes en el sistema y sus posibles causas.

3.8 Fase de Interpretación de la Cartas Dinográficas:

La interpretación puede ser cualitativa y cuantitativa aportando cada una de ellas información importante en el análisis de cada carta dinográfica. Con la interpretación cualitativa se aporta información de las condiciones o estado de los equipos de subsuelo, entrada de fluido a la bomba, esfuerzo sobre las cabillas y condiciones de producción del pozo. Este tipo de interpretación se basa en el análisis visual de la representación de una carta dinográfica.

Para la interpretación cuantitativa se usan cálculos matemáticos que proporciona información de las cargas de la barra pulida; por lo que pueden obtenerse valores como la carga máxima sobre la barra pulida, carga mínima sobre la barra pulida, elongación de las cabillas, cargas de las cabillas en el fluido, cargas de la cabilla en el aire, flotabilidad de las cabillas en el fluido, carga en la válvula viajera, carga en la válvula fija, carga de contrabalance, torque máximo de la unidad de bombeo, variación de torque con el recorrido de la barra pulida y la potencia del motor.

Las cargas máximas y mínimas de la barra pulida, las cargas debido al peso de las cabillas en el fluido, las cargas sobre la válvula viajera y la fija y la carga de

contrabalance se leen directamente de la carta dinográfica; para ello se necesita el registro y la constante de compresión del dinamómetro, en caso de ser mecánico o hidráulico, y la constante de carga en caso de ser un equipo electrónico. En este sentido, la carga sobre la válvula fija representa el peso de flotabilidad de las cabillas en el aire, menos la fuerza de flotabilidad de las cabillas en el fluido; este parámetro se define como (W_{rf}). La carga sobre la válvula viajera es la suma de la carga sobre la válvula fija más la carga del fluido estático sobre el pistón de la bomba. Entonces la diferencia entre las cargas de las válvulas viajera y fija, define la carga del fluido sobre la bomba (F_o).

La carga máxima sobre la barra pulida (PPRL) es igual a la suma de la carga sobre la válvula fija, más F_1 . El valor F_1 representa la suma de la carga estática del fluido (F_o), más el efecto dinámico de la carrera ascendente. La carga mínima sobre la barra pulida (MPRL) es igual a la carga sobre la válvula fija menos F_2 , el valor de F_2 representa el efecto dinámico del recorrido descendente.

CAPITULO IV

RESULTADOS Y ANALISIS

En el siguiente capítulo se muestran especificaciones del programa DinaHEPM para poder hacer uso del mismo, es una especie de instructivo que permite hacer más fácil el manejo de la herramienta. Por otro lado se presenta la validación de la herramienta con dos de los casos presentados en el artículo técnico “*An Improved Finite-Difference Calculation of Downhole Dynamometer Cards for Sucker-Rod Pumps*”, luego de validar, se muestran los resultados obtenidos con cada caso a través de DinaHEPM y además se interpreta cada carta dinagráfica en cada uno de los casos, de manera de conocer qué tipo de problema está afectando al sistema de producción.

4.1 Especificaciones del Programa DinaHEPM:

Mediante el presente Trabajo Especial de Grado se logró realizar el programa DinaHEPM; cuyo código fue realizado a través de la herramienta computacional MATLAB 2009a, se basa en el proceso o método explicado en el artículo técnico “*An Improved Finite-Difference Calculation of Downhole Dynamometer Cards for Sucker-Rod Pumps*”, igualmente basa sus cálculos en la ecuación de onda y el método numérico de diferencias finitas.

DinaHEPM es un programa que permite obtener cartas dinagráficas de fondo a partir de los datos de esfuerzo y desplazamientos de la carta de superficie, lo cual se logra a través de artificios y métodos matemáticos plasmados en su código. Cabe destacar que el programa calcula o representa las cartas dinagráficas de fondo sólo para casos donde la sarta de cabillas de producción sea de diámetro constante y además cuenta de forma interna en su código con un criterio de estabilidad para que el modelo funcione adecuadamente. Este programa requiere de diferentes datos al momento de ser utilizado, entre ellos están los datos de la carta de superficie, datos del pozo y datos de la bomba.

Para utilizar el programa es necesario recordar que el usuario debe contar con la instalación de la herramienta MATLAB en su computador, para acceder al programa DinaHEPM se debe abrir la carpeta llamada DinaHEPM, al abrirla el usuario encontrará un archivo de acceso directo que le permitirá entrar al programa haciendo doble clic derecho sobre el mismo, al hacerlo aparecerá en pantalla el código del programa, luego el usuario debe pulsar el botón F5 de su teclado e inmediatamente emergerá la ventana principal de DinaHEPM. Como se muestra en la Figura 4.1 en ella se encuentra las representaciones que se pueden obtener del programa las cuales son la carta dinagráfica de fondo, la gráfica de Posición vs Tiempo y la gráfica de Esfuerzo vs Tiempo y algunos de los datos utilizados para que puedan generarse las cartas de fondo.

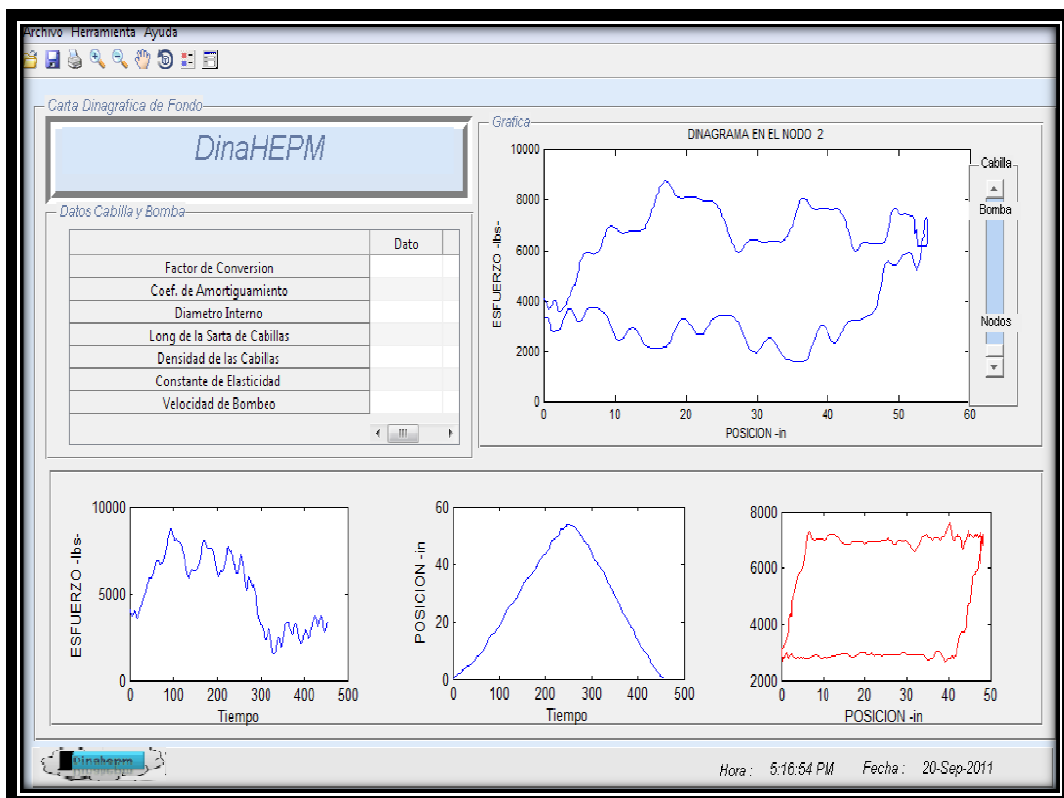


Figura 4.1 Ventana Principal del Programa DinaHEPM.

El siguiente paso a seguir para el uso correcto de DinaHEPM es ir a la barra superior de esta ventana y hacer clic en Herramienta (Ctrl-H), luego hacer clic en Carta de Superficie (Ctrl-C) y esto es para poder cargar los datos de la carta de superficie del pozo al cual se le desee generar la carta dianográfica de fondo y seguidamente como se muestra en la Figura 4.2 aparecerá la siguiente ventana que permite este procedimiento.

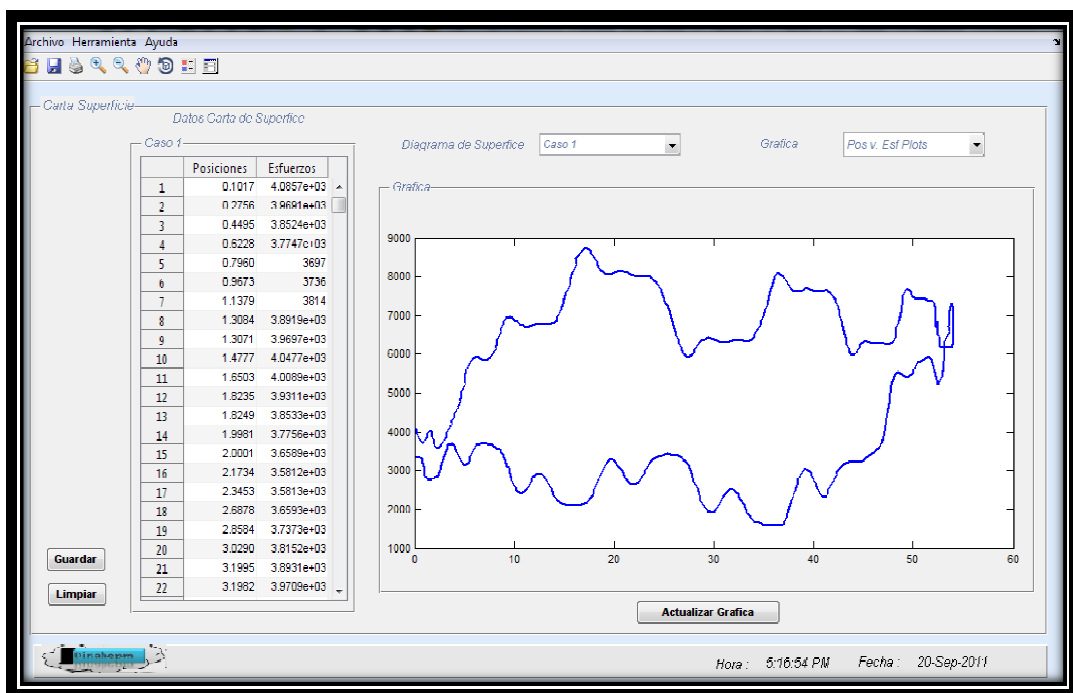


Figura 4.2 Ventana para Cargar la Carta de Superficie.

El programa ya tiene cargados los datos de cartas dinagráficas de superficies (caso1 y caso2). Para cargar los datos de la carta de superficie (esfuerzos y posiciones) de otro pozo se hace clic sobre "otro" y se puede adjuntar el archivo que contenga dichos datos buscándose en cualquier carpeta o lugar del computador donde éste se

encuentre, como lo muestra la Figura 4.3. Se debe considerar que el programa solo leerá archivos de extensión .mat.

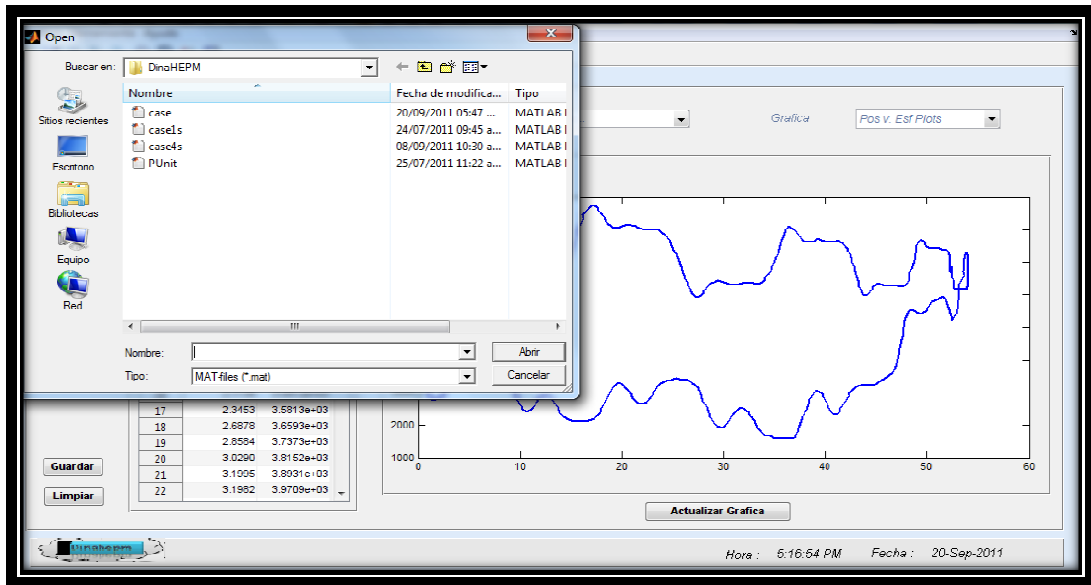
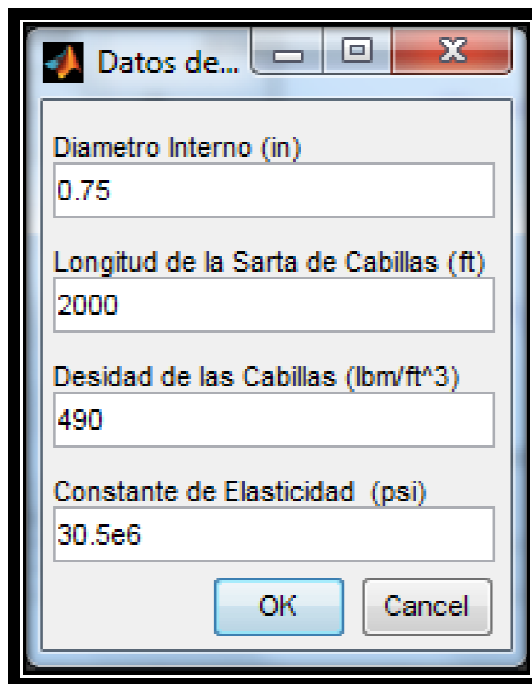


Figura 4.3 Ventana para Guardar los Datos de la Carta de Superficie.

Luego de cargar los datos, el usuario debe hacer clic en el botón actualizar gráfica para que sea generada la carta dinagráfica de superficie perteneciente a ese caso. Esta ventana muestra en dos columnas los datos pertenecientes a la carta de superficie que se esté representado, puede ser arreglado algún valor en caso de requerirlo y se pueden borrar estos datos al hacer clic en el botón limpiar. También existe la opción de ser agregados los datos manualmente, haciendo clic a “Limpiar”, se copian los valores y luego se hace clic a “Guardar”. En esta ventana del lado derecho se encuentra un botón en el que puede generar la gráfica de esfuerzo vs tiempo y la gráfica de posición vs tiempo, al hacer clic en esfuerzo o posición respectivamente.

Al tener la carta de superficie ya graficada, se busca Herramienta nuevamente y en este caso se hace clic a Cartas Dinagráficas (Ctrl-D), al hacerlo el programa vuelve a la página principal y aparece la primera ventana como lo indica la Figura 4.4, esta

llama “Datos del Pozo”, en ella se deben introducir los siguientes datos del pozo; Diámetro de la cabilla de producción, Longitud de la sarta de cabillas, Densidad de la cabilla y Constante de Elasticidad , tomando en cuenta las unidades en los cuales estos datos son pedidos; lo cual está señalado en cada casilla de datos.



Parameter	Value
Diametro Interno (in)	0.75
Longitud de la Sarta de Cabillas (ft)	2000
Desidad de las Cabillas (lbm/ft ³)	490
Constante de Elasticidad (psi)	30.5e6

Figura 4.4 Ventana para Cargar los datos del Pozo.

La siguiente ventana de datos como lo muestra la Figura 4.5, es la ventana que permite introducir los datos referentes a la bomba; “Datos de la bomba”, y sólo pide un dato el cual es la velocidad de la misma.

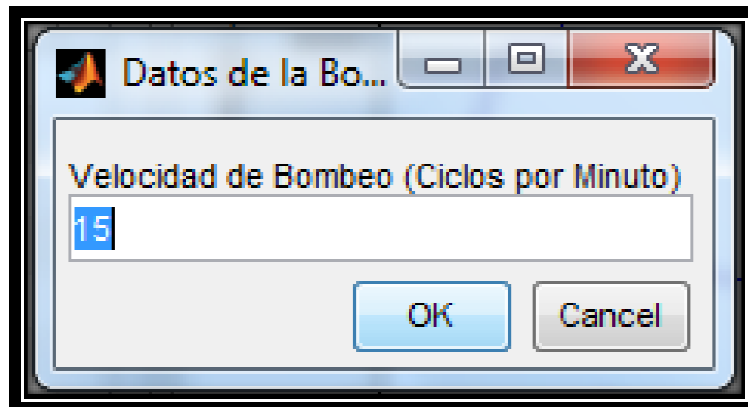


Figura 4.5 Ventana para cargar los datos de la Bomba.

Todos estos datos son requeridos por el programa para poder arrojar resultados satisfactorios. Estos resultados se observan en la figura 4.1, ventana principal la cual permite generar las cartas dinagráficas de fondo luego de ser introducido el dato de la velocidad de la bomba, en esta figura se puede observar la variación de la carta dinagráfica a través de los nodos a lo largo del pozo hasta llegar a la bomba donde se muestra la carta dinagráfica de fondo dibujada en color rojo. De igual forma debajo de este recuadro se puede visualizar la carta solo a nivel de la bomba (carta dinagráfica de fondo) y a su lado la representación de la gráfica de Posición vs Tiempo y la gráfica de Esfuerzo vs Tiempo.

Con la obtención de la carta dinagráfica de fondo a través del uso del programa pueden identificar los problemas que esté presentando el pozo, de ser ese el caso, esto se logra mediante la interpretación que se le realiza a dicha carta. La carta dinagráfica de superficie es un gráfico de medidas de esfuerzo y posiciones en un ciclo completo de bombeo; la carga es generalmente representada en libras de fuerza y el desplazamiento en pulgadas. La carta dinagráfica de la bomba o de fondo es un gráfico de los esfuerzos calculados en varias posiciones y representa el esfuerzo de la bomba en el fondo de la cabilla. Identificar el funcionamiento de la bomba y el

análisis de problemas de fondo son unos de los usos principales de la carta dinagráfica de fondo.

Las cartas dinagráficas de superficies no siempre permiten un diagnóstico completo del funcionamiento del sistema de levantamiento por bombeo mecánico, son importantes para diagnóstico de cabillas y torques de la unidad pero cuando se intenta diagnosticar problemas de fondo (a nivel de la bomba), no es suficiente el uso de la carta dinagráfica de superficie, ya que no puede determinar las condiciones existentes a nivel de la bomba. Las cartas dinagráficas de fondo proveen información precisa de las cargas en la bomba, lo que permite ilustrar las condiciones de la bomba y posible mal funcionamiento de los equipos de fondo.

4.2 Validación del Programa DinaHEPM:

Para la validación del presente programa se utilizaron dos ejemplos o casos presentados en el artículo técnico “An Improved Finite-Difference Calculation of Downhole Dynamometer Cards for Sucker-Rod Pumps”, los cuales corresponden a casos donde la cabilla de producción posee un diámetro constante; ya que esto es indispensable para obtener resultados satisfactorios con el uso del programa DinaHEPM.

Caso 1

Los datos correspondientes al primer caso están representados en las tablas 4.1; 4.2; 4.3 y la Figura 4.6 representa la carta de superficie de dicho caso.

Tabla 4.1 Datos de la Cabilla

Diámetro (plug)	0.75	Material	Acero
Longitud (pie)	2000	Elasticidad (lpc)	30.5×10^6

Tabla 4.2 Datos de Fondo

Diámetro del pistón (pulg)	2.5	Profundidad de la bomba (pie)	2000
Velocidad de la bomba (carrera/min)	15	Nivel del Fluido (pie)	2000
Condición de la bomba	Full	Gravedad específica del fluido	1,0

Tabla 4.3 Datos de la Unidad de Bombeo

Designación de Unidad	C-114-119-54	Longitud de la carrera (pulg)	54
Manufactura	Lufkin	Rotación	Sentido Horario

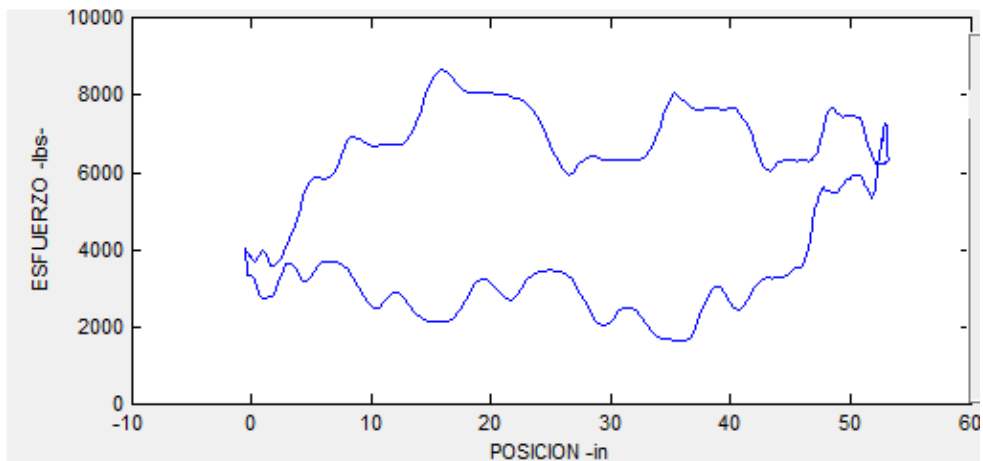


Figura 4.6 Carta Dinográfica de Superficie del Caso 1.

Caso 2

Los datos correspondientes al segundo caso están representados en las tablas 4.4; 4.5; 4.6 y la Figura 4.7 representa la carta de superficie de dicho caso.

Tabla 4.4 Datos de la Cabilla

Diámetro (pulg)	0.75	Material	Acero
Longitud (pie)	3179	Elasticidad (lpc)	30.5×10^6

Tabla 4.5 Datos de Fondo

Diámetro del pistón (pulg)	1.5	Profundidad de la bomba (pie)	3234
Velocidad de la bomba (carrera/min)	10	Nivel del Fluido (pie)	3234
Condición de la bomba	Full	Gravedad específica del fluido	0.8

Tabla 4.6 Datos de la Unidad de Bombeo

Designación de Unidad	C-114-143-64	Longitud de la carrera (pulg)	64
Manufactura	Lufkin	Rotación	Sentido Antihorario

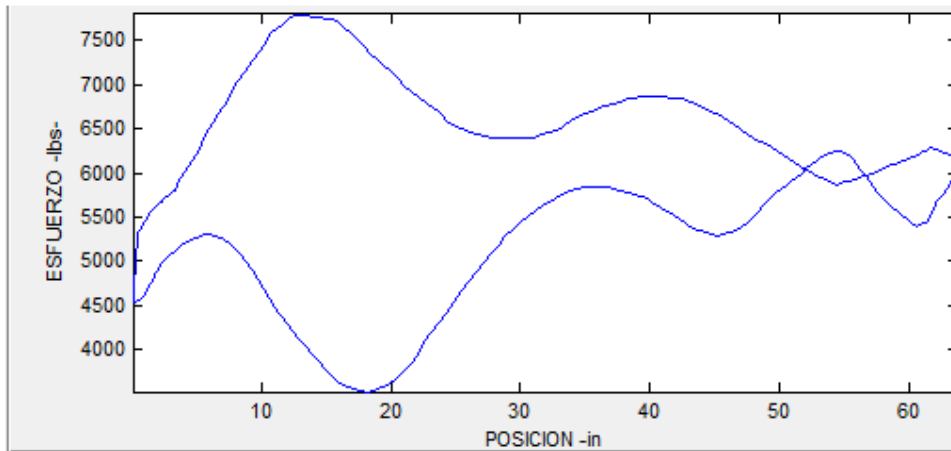


Figura 4.7 Carta Dinográfica de Superficie del Caso 2.

Las interpretaciones de las cartas dinográficas pueden ser de forma cualitativa y cuantitativa, la forma cualitativa se basa en la experiencia de la persona que realiza el análisis y la certeza de esta interpretación dependerá en gran medida de la habilidad y del conocimiento que pueda poseer el analista. La interpretación cuantitativa complementa la anterior mediante cálculos matemáticos que representan las cargas del sistema.

A continuación se realiza una verificación del programa y se presenta un análisis cualitativo y cuantitativo de cada uno de los casos anteriormente mencionados.

Caso 1

Al verificar el programa DinaHEPM con este primer caso se obtiene la siguiente representación de la carta dinográfica de fondo, mostrada en la figura 4.8.

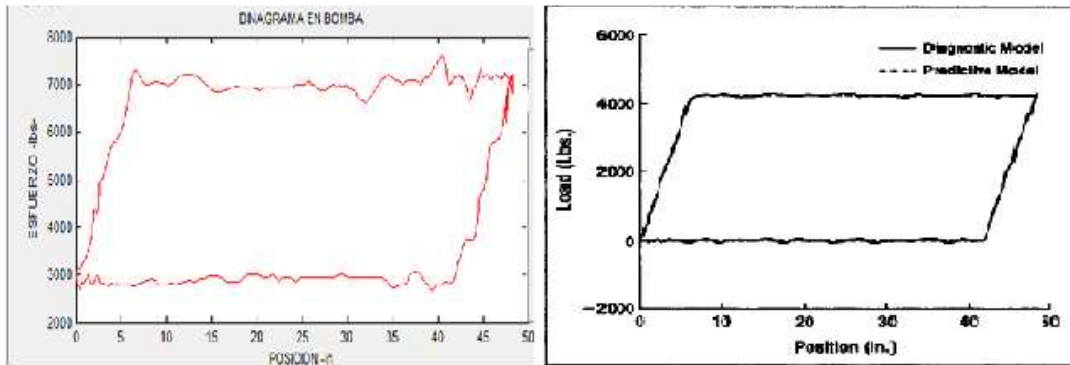


Figura 4.8 Carta Dinagráfica de Fondo del Caso 1. ^[9]

4.2.1 Interpretación Cualitativa de la Carta Dinagráfica de Fondo del Caso 1

A partir de un análisis visual de la carta de fondo y realizando comparaciones con las formas de cartas dinagráficas ya encontradas en libros de textos, artículos técnicos y manuales donde se representan los problemas generalmente encontrados en el sistema de producción de bombeo mecánico (lo cual engloba problemas de funcionamiento o problemas en los equipos de fondo) se observa que la carta dinagráfica de fondo presentada corresponde con la forma de una carta dinagráfica ideal, en la cual durante la carrera ascendente la carga de es mayor debido a la carga est tica del peso de la columna de fluido en la tubería de producción, este tipo de carta muestra una situación de bombeo donde el llenado de fluido es completo y no hay compresión o expansión de gas durante la embolada.

4.2.2 Interpretación Cuantitativa de la Carta dinagráfica de Fondo del Caso 1:

La interpretación cuantitativa es fundamentada en cálculos matemáticos que permitan conocer las cargas que pueden existir en distintos elementos del sistema.

Mediante la carta dinagráfica de fondo se pueden leer los valores correspondientes a la carga máxima y la carga mínima representados por el valor de esfuerzo máximo y el valor de esfuerzo mínimo respectivamente, así como también puede obtenerse el

valor del desplazamiento neto de la bomba y a partir de estos parámetros poder conocer otros como la potencia de la cabilla y la potencia hidráulica. Todos estos resultados se ven reflejados en la Tabla 4.7 y son obtenidos mediante el uso de las ecuaciones 2.4 y 2.9 – 2.14, también se debe destacar que para el cálculo de la tasa se uso una eficiencia del 80%.

Tabla 4.7 Resultados de la Interpretación Cuantitativa del Caso 1

Carga Máxima (lbs)	Carga Mínima (lbs)	Efecto de Contrabalance (lbs)	Tasa (bbl/d)	Potencia Hidráulica (hp)
7000	3000	5000	376	5.5

Caso 2

Al verificar el programa DinaHEPM con el segundo caso se obtiene la siguiente representación de la carta dinográfica de fondo, mostrada en la figura 4.9.

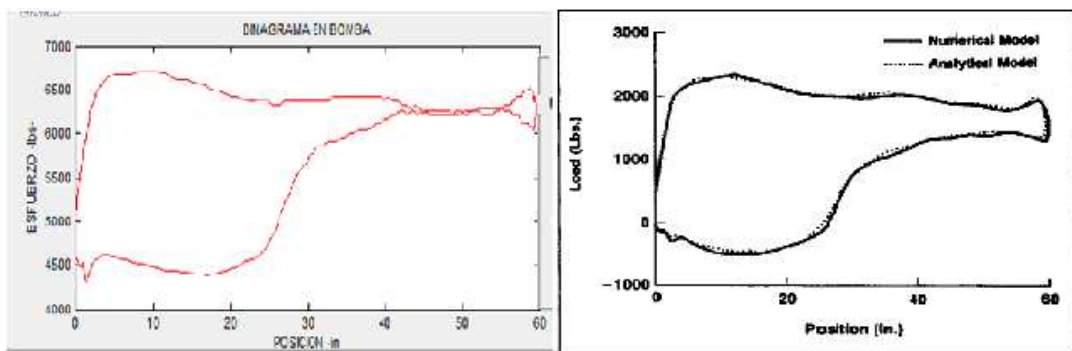


Figura 4.9 Carta Dinográfica de Fondo del Caso 2. [9]

4.2.3 Interpretación Cualitativa de la Carta Dinográfica de Fondo del Caso 2

Para este segundo caso y al ser igualmente estudiado como el caso anterior; a través de comparaciones con cartas ya existentes se puede inferir que el sistema está presentando un problema de interferencia de gas.

A pesar de que el nivel de fluido esté a la misma altura de la profundidad de la bomba, la carta muestra que existe algún problema y es probable que está succionando gas la bomba. La interferencia de gas ocurre cuando la bomba maneja cantidades apreciadas de gas, debido al aumento de la presión causando que el gas disuelto en el crudo se libere. Por la interferencia de gas hay una disminución en la eficiencia del sistema.

4.2.4 Interpretación Cuantitativa de la Carta Dinográfica de Fondo del Caso 2:

La siguiente interpretación se basará en la obtención de valores de la carta de fondo correspondiente y se utilizarán las ecuaciones presentadas anteriormente. Los Resultados se presentan en la Tabla 4.8, los cuales son presentados a continuación:

Tabla 4.8 Resultados de la Interpretación Cuantitativa del Caso 2

Carga Máxima (lbs)	Carga Mínima (lbs)	Efecto de Contrabalance (lbs)	Tasa (bbl/d)	Potencia Hidráulica (hp)
7000	3000	5000	376	5.5

CAPITULO V

CONCLUSIONES

1. La revisión de bibliografía y artículos técnicos ofrece una fuente importante de datos, ya que los casos que se analizan en este Trabajo Especial de Grado se extraen de los mismos para su posterior análisis.
2. Las cartas dinagráficas son valiosas para hacer diagnósticos de pozos que operen con el sistema de producción de bombeo mecánico; ya que su correcta interpretación permite conocer condiciones que reflejen el comportamiento del sistema, con lo cual se previene o se corrigen problemas existentes.
3. Las cartas dinagráficas de fondo arrojan información más completa y precisa de las condiciones de la bomba y de los equipos de subsuelo en comparación con la carta dinagráfica de superficie.
4. Obtener las cartas dinagráficas de fondo es un proceso complejo que requiere de un alto nivel de comprensión matemático y es necesaria la utilización de una herramienta computacional para poder generarlas.
5. El análisis cualitativo de una carta dinagráfica debe ser respaldado por el análisis cuantitativo; ya que este último se fundamenta en cálculos matemáticos que soportan cada interpretación.

6. DinaHEPM es un programa que genera cartas dinagráficas de fondo para casos de diámetro y densidad constante, fue realizado de tal manera que su manipulación sea sencilla para cualquier usuario, lo que lo hace un programa accesible y de fácil manejo.
7. Es muy importante realizar un buen manejo de los datos disponibles, ya que se podría llegar a resultados totalmente erróneos.
8. De las cartas dinagráficas se puede obtener valores directos que permitirán conocer parámetros como la potencia en el sistema a través de cálculos matemáticos.
9. Las cartas dinagráficas de fondo obtenidas a través de la herramienta DinaHEPM son aproximaciones aceptables al compararlas con los resultados encontrados en el artículo técnico de la SPE 18189, “An Improved Finite-Difference Calculation of Downhole Dynamometer Cards for Sucker- Rod Pumps”; lo cual demuestra que la herramienta genera resultados confiables.

CAPITULO IV

RECOMENDACIONES

1. Ampliar la herramienta computacional DinaHEPM de manera que se puedan obtener cartas dinagráficas de fondo y analizar casos donde la sarta posea cabillas de diferentes diámetros y de diferente densidad.
2. Utilizar la herramienta y verificarla mediante el uso de datos de campo.
3. Profundizar la herramienta con el fin de obtener el análisis cuantitativo directamente de la herramienta.
4. Evaluar la herramienta mediante la comparación de los resultados obtenidos con la misma y los resultados que pueda arrojar otra herramienta comercial para un caso determinado.
5. Continuar la investigación de tal forma que pueda elaborarse un método diagnóstico a través de una herramienta computacional que permita la integración subsuelo- superficie, el IPR (*Inflow performance relationship*) y el TPR (*Tubing Performance Relationship*).
6. Comparar el método numérico de resolución utilizado con otros ya existentes para evaluar la precisión del mismo.
7. Diseñar el programa utilizando la cinemática del sistema de bombeo y así optimizar la herramienta.
8. Complementar la herramienta de manera que la misma realice tanto un análisis cualitativo como cuantitativo.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] CIED, PDVSA 2001 *Diseño de Instalaciones de Levantamiento Artificial por Bombeo Mecánico*. Primera Edición. Curso de Bombeo Mecánico. Caracas Venezuela.
- [2] Theta Enterprise, Inc (1989-2005). Optimización de Bombeo Mecánico (Manual de Entrenamiento Levantamiento Artificial). California, USA John G. Svinos.
- [3] C. Galindo, H. Semprum (2008) *Estudio Integral del Comportamiento de Pozos con Bombeo Mecánico*. Trabajo Especial de Grado. Inédito. Universidad Central de Venezuela, Facultad de Ingeniería. Escuela de Ingeniería de Petróleo.
- [4] Guía de Ingeniería de Producción I. Universidad Central de Venezuela. Escuela de Ingeniería de Petróleo. Profa. Lisbeth Miranda.
- [5] Borrás S., Catherine del S. (2000). *Diseño de una Metodología de Interpretación de las Cartas Dinagráficas para los Campos de la Faja del Orinoco*. Trabajo Especial de Grado. Inédito. Universidad Central de Venezuela, Facultad de Ingeniería. Escuela de Ingeniería de Petróleo.
- [6] D. Kincaid, W. Cheney, Numerical Analysis Mathematics of Scientific Computing. 1991.
- [7] D.J Schafer , J.W Jennings,” An Investigation of Analytical and Numerical Sucker Rod Pumping Mathematical Models”. Artículo Técnico de la SPE 16919.
- [8] I. Paykin. Numerical Analysis of PDEs: A Finite Difference Method for the Wave Equation, Damped Wave Equation and Free Vibration of Beam. Computational physics. Fuente: <http://www.paykin.info/irina/Project-2.php> Numerical Analysis of PDEs: A Finite Difference Method for the Wave Equation, Damped Wave Equation and Free Vibration of Beam. Consultado en Septiembre 2011.

[9] T.A. Everitt, J.W. Jennings “An Improved Finite- Difference Calculation of Downhole Dinamometer Cards for Sucker- Rod Pumps”. Artículo técnico de la SPE 18189. (1992).

BIBLIOGRAFIA

AKhdabandeh and S. Miska, New México Institute of mining & Technology. A Simple Method for Predicting The Performance of Sucker Rod Pumping System.

B. Guo, PH.D. W. C. Lyons, PH.D, A. Ghalambor, PH.D . Petroleum Production Engineering. A computer assisted approach. 2007.

C. Borrás S., (2004). *Diseño de una Metodología de Interpretación de las Cartas Dinagráficas para los Campos de la Faja del Orinoco*. Trabajo Especial de Grado. Inédito. Universidad Central de Venezuela, Facultad de Ingeniería. Escuela de Ingeniería de Petróleo.

C. Galindo, H. Semprum (2008) *Estudio Integral del Comportamiento de Pozos con Bombeo Mecánico*. . Trabajo Especial de Grado. Inédito. Universidad Central de Venezuela, Facultad de Ingeniería. Escuela de Ingeniería de Petróleo.

D.J Schafer , J.W Jennings, An Investigation of Analytical and Numerical Sucker Rod Pumping Mathematical Models. Artículo técnico de la SPE 16919. 1992

D. Kincaid, W. Cheney, Numerical Analysis Mathematics of Scientific Computing. 1991.

E. Isaacson, H. E- Keller “Analysis of Numerical Methods” New York, 1994.

Elsevier. Petroleum Production Engineering. 2007.

F. G. Seballos, Tutorial de Matlab (Marzo-2000).

G. Vignolo , J.A. Vázquez. Método de Cálculo de Cartas Dinamométricas de Fondo a partir de Cartas de Superficie. Mecánica computacional Vol XXVIII. Asociación Argentina de Mecánica Computacional. 2009.

H. Bradley, Petroleum Engineering Handbook. Part 1.

I. Paykin. Numerical Analysis of PDEs: A Finite Difference Method for the Wave Equation, Damped Wave Equation and Free Vibration of Beam. Computational physics. Fuente: <http://www.paykin.info/irina/Project-2.php> Numerical Analysis of PDEs: A Finite Difference Method for the Wave Equation, Damped Wave Equation and Free Vibration of Beam.

J. García de Jalón, J. Rodríguez, A. Brazález, Aprende Matlab 6.1 como si estuviera en primero. Madrid Octubre 2001. Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales. Universidad Politécnica de Madrid.

J. G. Svinos. Theta Enterprise, Inc (1989-2005). Optimización de Bombeo Mecánico (Manual de Entrenamiento Levantamiento Artificial). California, USA.

J.M Eubanks, B.L Franks, D.K Lawrence, T.E Maxwell, C.J Merryman. "Pumping Well Problem Analysis" Texas, 1958.

M. Golan, C. Whitson. Well Performance. Second Edition. Norwegian University of science and technology (NTNU).

T.A. Everitt, J.W. Jennings "An Improved Finite- Difference Calculation of Downhole Dinamometer Cards for Sucker- Rod Pumps". Artículo técnico de la SPE 18189. (1992).

T. E. W. Nind. Principles of Oil Well Production. Trent University, Ontario, Canada. Secon Edition.

Y. Skiba "Métodos y Esquemas Numéricos: Un Análisis Computacional". Universidad Nacional Autónoma de México. México. pp. 376.

GLOSARIO

Algoritmo: Conjunto ordenado y finito de operaciones que permite hallar la solución de un problema.

Ancla de gas: extensiones de bombas, las cuales separan el gas libre del líquido producido antes de que entre en la bomba.

Barril: sección donde se mueve el pistón en sus recorridos ascendentes y descendentes.

Barra pulida: sección que une la sarta de cabillas a la unidad de bombeo.

Bomba de subsuelo: bomba pistón que funciona por diferencias de presión.

Contrapesos: componente del sistema de bombeo mecánico, cuya función es la resistencia al cambio de velocidad.

Carta dinográfica: registro de cargas versus posición a lo largo de la barra pulida en un instante durante un ciclo de bombeo.

Compresión: Esfuerzo a que está sometido un cuerpo por la acción de dos fuerzas opuestas que tienden a disminuir su volumen.

Diferencias finitas: aproximación para encontrar la solución numérica de las ecuaciones que gobiernan el modelo matemático.

Dinamómetro: Instrumento para medir fuerzas.

Esfuerzo: magnitudes físicas con unidades de fuerza.

Empacaduras: accesorio utilizado para realizar sellados en juntas mecanizadas.

Flotabilidad: capacidad de un cuerpo para sostenerse dentro del fluido.

Matlab: software matemático que ofrece un entorno de desarrollo integrado con un lenguaje de programación propio.

Motor de combustión interna: motores térmicos en los cuales se produce una combustión del fluido del motor.

Motor eléctrico: motores en los cuales se obtiene trabajo a partir de una corriente eléctrica.

Pistón: sección móvil de la bomba de subsuelo.

Prensa-estopa: empaadura ubicada en el cabezal del pozo que impide el derrame de petróleo.

Revestidor: sección de tubería que recubre las paredes del hoyo.

Sarta de cabillas de succión: conjunto de cabillas cuya función es, transferir energía, soportar cargas y accionar la bomba.

Tensión: fuerza por unidad de área en el entorno de un punto material sobre una superficie.

Válvula fija: controla la entrada de fluidos desde el pozo al interior de la bomba.

Válvula viajera: sección de la bomba ubicada en el pistón de la misma, la cual se encuentra regulada por diferencia de fuerzas.

APÉNDICE A

CÓDIGO DE LA HERRAMIENTA DinaHEPM

```
function varargout = Dinahepm(varargin)
gui_Singleton = 1;
gui_State = struct('gui_Name',    mfilename, ...
                  'gui_Singleton', gui_Singleton, ...
                  'gui_OpeningFcn', @Dinahepm_OpeningFcn, ...
                  'gui_OutputFcn', @Dinahepm_OutputFcn, ...
                  'gui_LayoutFcn', [] , ...
                  'gui_Callback', []);

if nargin && ischar(varargin{1})
    gui_State.gui_Callback = str2func(varargin{1});
end

if nargin && isstr(varargin{1})
    gui_State.gui_Callback = str2func(varargin{1});
end

if nargout
    [varargout{1:nargout}] = gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
else
    gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
end

function Dinahepm_OpeningFcn(hObject, eventdata, handles, varargin)
% This function has no output args, see OutputFcn.
```

```

% hObject handle to figure
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles structure with handles and user data (see GUIDATA)
% varargin command line arguments (see VARARGIN)

handles.output = hObject;

% Update handles structure
guidata(hObject, handles);

load case1s
    a=size(X);
    for car=1:a(1,1)
        sta(car,1)=X(car,1);
        sta(car,2)=F(car,1);
        set(handles.uitable3,'Data',sta);
    end
    save('case.mat', 'X', 'F');
a=imread('logo', 'bmp');
a=uint8(a);
Img=image(a,'Parent',handles.axes53);
set(handles.axes53,'Visible','off','YDir','reverse','XLim',get(Img,'XData'),'XLim',get(I
mg,'YData'));
set(handles.text33,'String',datestr(fix(clock),14))
set(handles.text35,'String',datestr(fix(clock),1))
input_file = load('Matriz.dyn');
A1= input_file(1,1);
A2= input_file(1,2);
A3= input_file(1,3);
A4= input_file(1,4);
DX= input_file(1,5);
A= input_file(1,6);

```

```

E= input_file(1,7);
M= input_file(1,8);
N= input_file(1,9);
U= input_file(:,:);
    Fp = E*A/DX*(U(M+1,:) - U(M,:));
    Xp = -12*(U(M+1,:) - max(U(M+1,:)));
    hold on
    plot(handles.axes51,0);
    plot(handles.axes51,Xp,Fp,'r');
    xlabel(handles.axes51,'POSICION -in'); ylabel(handles.axes51,'ESFUERZO -
lbs-'); title (handles.axes51,'DINAGRAMA EN BOMBA');
load case
set(handles.slider18,'Max',100);
    plot(handles.axes22,0);
    plot(handles.axes23,0);
    plot(handles.axes24,0)
    plot(handles.axes22,X(:,1), 'b-');
    plot(handles.axes23,F(:,1), 'b-');
    plot(handles.axes24,X(:,1), F(:,1))
    xlabel(handles.axes24,'POSICION -in'); ylabel(handles.axes24,'ESFUERZO -lbs-');
title (handles.axes24,'DINAGRAMA EN EL NODO 2');
    axis tight
    xlabel(handles.axes22,'Tiempo'); ylabel(handles.axes22,'POSICION -in');
    xlabel(handles.axes23,'Tiempo'); ylabel(handles.axes23,'ESFUERZO -lbs-');
% --- Executes during object creation, after setting all properties.

```

```

function axes53_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject handle to axes53 (see GCBO)
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB

```

```
% handles    empty - handles not created until after all CreateFcns called
```

```
% Hint: place code in OpeningFcn to populate axes53
```

```
function varargout = Dinahepm_OutputFcn(hObject, eventdata, handles)  
% varargout cell array for returning output args (see VARARGOUT);  
% hObject    handle to figure  
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB  
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)  
% Get default command line output from handles structure  
varargout{1} = handles.output;
```

```
function Untitled_3_Callback(hObject, eventdata, handles)  
% hObject    handle to Untitled_3 (see GCBO)  
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB  
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)  
Close
```

```
function Untitled_4_Callback(hObject, eventdata, handles)  
% hObject    handle to Untitled_4 (see GCBO)  
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB  
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)  
about
```

```
function pushbutton4_Callback(hObject, eventdata, handles)  
% hObject    handle to pushbutton4 (see GCBO)  
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB  
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)
```

CartSp_IPRcOB

```
function pushbutton5_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject handle to pushbutton5 (see GCBO)
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles structure with handles and user data (see GUIDATA)
pushbutton16_Callback(hObject, eventdata, handles)
```

```
function Untitled_9_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject handle to Untitled_9 (see GCBO)
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles structure with handles and user data (see GUIDATA)
uipushtool1_ClickedCallback(hObject, eventdata, handles)
```

```
function uitoggetool5_ClickedCallback(hObject, eventdata, handles)
```

rotate3d on

```
function uipushtool5_ClickedCallback(hObject, eventdata, handles)
% hObject handle to uipushtool5 (see GCBO)
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles structure with handles and user data (see GUIDATA)
set(handles.uipanel15,'Visible','off');
set(handles.uipanel18,'Visible','on');
```

```
function Untitled_11_Callback(hObject, eventdata, handles)
```



```
% hObject handle to Untitled_11 (see GCBO)
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles structure with handles and user data (see GUIDATA)
tablestat
```

```
function Untitled_13_Callback(hObject, eventdata, handles)
uipushtool5_ClickedCallback(hObject, eventdata, handles)
```

```
function Untitled_16_Callback(hObject, eventdata, handles)
pushbutton15_Callback(hObject, eventdata, handles)
```

```
function Untitled_19_Callback(hObject, eventdata, handles)
pushbutton8_Callback(hObject, eventdata, handles)
```

```
function Untitled_20_Callback(hObject, eventdata, handles)
```

```
pushbutton9_Callback(hObject, eventdata, handles)
```

```
function uipushtool2_ClickedCallback(hObject, eventdata, handles)
% hObject handle to uipushtool2 (see GCBO)
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles structure with handles and user data (see GUIDATA)
%print -dwinc
printpreview
```

```
function Untitled_21_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject handle to Untitled_21 (see GCBO)
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles structure with handles and user data (see GUIDATA)
pushbutton26_Callback(hObject, eventdata, handles)
```

```
function uitoggletool1_ClickedCallback(hObject, eventdata, handles)
% hObject handle to uitoggletool1 (see GCBO)
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles structure with handles and user data (see GUIDATA)
zoom on
zoom out
```

```
function uitoggletool2_ClickedCallback(hObject, eventdata, handles)
% hObject handle to uitoggletool2 (see GCBO)
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles structure with handles and user data (see GUIDATA)
zoom out
zoom on
```

```
function uitoggletool3_ClickedCallback(hObject, eventdata, handles)
% hObject handle to uitoggletool3 (see GCBO)
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles structure with handles and user data (see GUIDATA)
pan on
```

```
function uipushtool3_ClickedCallback(hObject, eventdata, handles)
% hObject handle to uipushtool3 (see GCBO)
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles structure with handles and user data (see GUIDATA)
pushbutton29_Callback(hObject, eventdata, handles)
```

```
function pushbutton24_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject handle to pushbutton24 (see GCBO)
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
```

```

% handles  structure with handles and user data (see GUIDATA)
set(handles.uipanel24,'Visible','off');

function slider5_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject  handle to slider5 (see GCBO)
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles  empty - handles not created until after all CreateFcns called

% Hint: slider controls usually have a light gray background.
if isequal(get(hObject,'BackgroundColor'), get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor',[.9 .9 .9]);
end

% -----
function Untitled_17_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject  handle to Untitled_17 (see GCBO)
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles  structure with handles and user data (see GUIDATA)

% --- Executes on slider movement.
function slider5_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject  handle to slider5 (see GCBO)
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles  structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hints: get(hObject,'Value') returns position of slider
%       get(hObject,'Min') and get(hObject,'Max') to determine range of slider

```

```

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

```

```

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function uipanel24_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to uipanel24 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all CreateFcns called

```

```

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function uipushtool1_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to uipushtool1 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all CreateFcns called

```

```

% -----
function uipushtool1_ClickedCallback(hObject, eventdata, handles)
set(handles.uipanel18,'Visible','off');
set(handles.uipanel15,'Visible','on');
% Datos del Pozo
Gc = 32.2; % Factor de Conversión (lbm*ft/lbf/s^2)
sta1(1,1)=Gc;

```

```

M = 100; % Número de Nodos - 1 (Nodos: 0 a m)
NT = 360; % Número de Valores de Tiempo Calculados en la Bomba (Un Ciclo
Completo con el Primer Punto Repetidos)
C = 0.8; % Coeficiente de Amortiguamiento (s^-1)
sta1(2,1)=C;
dlg_title = 'Datos de la Cabilla';
prompt = {'Diametro Interno (in)', 'Longitud de la Sarta de Cabillas (ft)', 'Densidad de
las Cabillas (lbm/ft^3)', 'Constante de Elasticidad (psi)'};
num_lines = 1;
def = {'0.75', '2000', '490', '30.5e6'};
options.Resize='on';
answer = inputdlg(prompt,dlg_title,num_lines,def,options);
in = str2double(char(answer(1)));
L = str2double(char(answer(2)));
Rho = str2double(char(answer(3)));
E = str2double(char(answer(4)));
sta1(3,1)=in;
sta1(4,1)=L;
sta1(5,1)=Rho;
sta1(6,1)=E;
dlg_title = 'Datos de la Bomba';
prompt = {'Velocidad de Bombeo (Ciclos por Minuto)'};
num_lines = 1;
def = {'15'};
options.Resize='on';
answer = inputdlg(prompt,dlg_title,num_lines,def,options);
T = str2double(char(answer(1)));
sta1(7,1)=T;
A = pi/4*(in)^2; % Area Transversal de las Cabillas (in^2)
set(handles.uitable22,'Data',sta1);

```

load case

```
%% Interpolación de la Carta de Superficie a Intervalos Regulares DT
% La Carta debe estar digitalizada en vectores columnas X y F, subiendo y
% luego bajando. Se admiten puntos repetidos pero no retrocesos.
```

```
[Xmin, IXmin] = min(X);
X = circshift(X, 1 - IXmin);
F = circshift(F, 1 - IXmin);
[Xmax, IXmax] = max(X);
```

```
Xu = X(1:IXmax);
Xd = [X(IXmax: end); X(1)];
Fu = F(1:IXmax);
Fd = [F(IXmax: end); F(1)];
```

```
S = Xmax - Xmin;
```

```
% Cargar Cinemática de la Unidad de Bombeo a Intervalos de Tiempo Regulares (Xi)
% Desplazamiento Positivo en Ascenso
```

load PUnit

```
% Interpolación de Xi en NT Puntos
Ni = length(Xi);
Xi = interp1(linspace(0,1,Ni + 1), [Xi; Xi(1)], (0:NT - 1)/NT);
```

```
[Ximin, IXimin] = min(Xi);
```

```

Xi = circshift(Xi, 1 - IXimin);
[Ximax, IXimax] = max(Xi);

Xi = Xmin + S*(Xi - Ximin)/(Ximax - Ximin);

Xiu = Xi(1:IXimax);
Xid = Xi(IXimax + 1:end);
Fiu = interp1(Xu, Fu, Xiu, 'linear', 'extrap');
Fid = interp1(Xd, Fd, Xid);
Fi = [Fiu; Fid];

plot(handles.axes24,0, 'b-');
plot(handles.axes51,0, 'b-');
plot(handles.axes22,0, 'b-');
plot(handles.axes23,0, 'b-');

t=['DINAGRAMA EN EL NODO ',int2str(1)];
plot(handles.axes24,Xi, Fi, 'b-');
plot(handles.axes51,Xi, Fi, 'b-');
plot(handles.axes22,Xi, 'b-');
plot(handles.axes23,Fi, 'b-');
xlabel(handles.axes24,'POSICION -in'); ylabel(handles.axes24,'ESFUERZO -lbs-');
title (handles.axes24,t);
xlabel(handles.axes22,'Tiempo'); ylabel(handles.axes22,'POSICION -in');
xlabel(handles.axes23,'Tiempo'); ylabel(handles.axes23,'ESFUERZO -lbs-');
axis tight
%% Valores Calculados
% Incremento de Tiempo (s)
DT = 60/T/(NT - 1);

```

```

% Incremento de Longitud (ft)
DX = L/(M - 1);

% Velocidad de Propagación de la Onda (ft/s)
V = sqrt(144*E*Gc/Rho);

% Criterio de Estabilidad
Cest = DX/V/DT;
if Cest >= 1
    disp(['Atención. Coeficiente de Estabilidad: ' num2str(Cest) ' >= 1'])
end

% Coeficiente Alfa
Alpha = (DX/DT^2)*Rho*A/144/Gc;

% Coeficientes de la Ecuación de Ondas Discretizada
A1 = Alpha*(1 + C*DT)/(E*A/DX);
A2 = -(Alpha*(2 + C*DT) - 2*E*A/DX)/(E*A/DX);
A3 = Alpha/(E*A/DX);
A4 = -1;

% Número Total de Valores de Tiempo (Válidos en Superficie)
N = 2*(M - 1) + NT; % Número Mínimo de Valores
Nrep = ceil(N/NT); % Número de Repeticiones de la Carta de Superficie
N = Nrep*NT; % Múltiplo de NT - 1

nap=zeros(1,N);
nap(1,1:N)=0;
nap(1)=A1;

```



```

nap(2)=A2;
nap(3)=A3;
nap(4)=A4;
nap(5)=DX;
nap(6)=A;
nap(7)=E;
nap(8)=M;
nap(9)=N;

if M > 10
    set(handles.slider18,'Max',M);
end

% Matriz Nodal de Desplazamientos: (M + 1)*N U(X, T); (ft)
U = NaN(M + 1, N);

% Inicialización de la Primera Fila de U (Superficie). Conversión a ft.
U(1,:) = repmat(-Xi'/12, 1, Nrep);

% Inicialización de la Segunda Fila de U (Segundo Nodo)
U(2,:) = repmat(Fi'*DX/E/A, 1, Nrep) + U(1,:);

% Lazo Principal en X (Profundidad)
for i = 3:M + 1
    U(i,i-1:N-i+2) = A1*U(i-1,i:N-i+3) + A2*U(i-1,i-1:N-i+2) + A3*U(i-1,i-2:N-i+1) +
    A4*U(i-2,i-1:N-i+2);
end
[fi,texto] = fopen('Matriz.dyn','w');
st = fclose(fi);
dlmwrite('Matriz.dyn',nap,'-append','delimiter','\t');

```

```

dlmwrite('Matriz.dyn',U,'-append','delimiter','\t');
    Fp = E*A/DX*(U(M+1,:) - U(M,:));
    Xp = -12*(U(M+1,:) - max(U(M+1,:)));
    hold on
    plot(handles.axes51,0,'r');
    plot(handles.axes51,Xp,Fp,'r');
xlabel(handles.axes51,'POSICION -in'); ylabel(handles.axes51,'ESFUERZO -lbs-');
title (handles.axes51,'DINAGRAMA EN BOMBA');

```

```

function popupmenu2_Callback(hObject, eventdata, handles)
index = get(hObject,'Value'); % What plot type is requested?
strlist = get(hObject,'String'); % Get the choice's name
set(handles.uipanel21,'Title',strlist(index)) % Rename uipanel3
if isequal(index,1)
    load case1s
elseif isequal(index,2)
    load case4s
elseif isequal(index,3)
    uiopen('LOAD')
end
plot(handles.axes11,0,'LineWidth',2);
plot(handles.axes11,X(:,1),F(:,1),'LineWidth',2);
xlabel(handles.axes11,'POSICION -in'); ylabel(handles.axes11,'ESFUERZO -
lbs-'); title (handles.axes11,'DINAGRAMA DE SUPEFICIE');
axis tight
a=size(X);

```

```

for car=1:a(1,1)
sta(car,1)=X(car,1);
sta(car,2)=F(car,1);
set(handles.uitable3,'Data',sta);
end
save('case.mat', 'X', 'F');

```

% --- Executes during object creation, after setting all properties.

```

function popupmenu2_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

```

% --- Executes on selection change in popupmenu3.

```

function popupmenu3_Callback(hObject, eventdata, handles)
index2 = get(hObject,'Value');
load case
plot(handles.axes11,0,'LineWidth',2);
if isequal(index2,1)
plot(handles.axes11,X(:,1),F(:,1),'LineWidth',2);
xlabel(handles.axes11,'POSICION -in'); ylabel(handles.axes11,'ESFUERZO -lbs-');
title(handles.axes11,'DINAGRAMA DE SUPEFICIE');
axis tight
elseif isequal(index2,2)
plot(handles.axes11,X(:,1),'LineWidth',2);
xlabel(handles.axes11,'Tiempo'); ylabel(handles.axes11,'POSICION -in');

```

```

elseif isequal(index2,3)
    plot(handles.axes11,F(:,1),'LineWidth',2);
    xlabel(handles.axes11,'Tiempo'); ylabel(handles.axes11,'ESFUERZO -lbs-');
end

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function popupmenu3_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

% --- Executes on button press in pushbutton26.
function pushbutton26_Callback(hObject, eventdata, handles)
table = get(handles.uitable3,'Data');
X=table(:,1);
F=table(:,2);
plot(handles.axes11,X(:,1),F(:,1),'LineWidth',2);
save('case.mat', 'X', 'F');
uisave({'X','F'},'case');

% --- Executes on button press in pushbutton28.
function pushbutton28_Callback(hObject, eventdata, handles)
    for car=1:100
        sta(car,1)=0;
        sta(car,2)=0;
        set(handles.uitable3,'Data',sta);
    end

```

end

% --- Executes during object creation, after setting all properties.

```
function pushbutton28_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
```

% --- Executes on button press in pushbutton29.

```
function pushbutton29_Callback(hObject, eventdata, handles)
```

```
table = get(handles.uitable3,'Data');
```

```
X=table(:,1);
```

```
F=table(:,2);
```

```
save('case.mat', 'X', 'F');
```

```
plot(handles.axes11,X(:,1),F(:,1),'LineWidth',2);
```

```
xlabel(handles.axes11,'POSICION -in'); ylabel(handles.axes11,'ESFUERZO -lbs-');
```

```
title (handles.axes11,'DINAGRAMA DE SUPEFICIE');
```

% -----

```
function uipushtool8_ClickedCallback(hObject, eventdata, handles)
```

```
set(handles.uipanel15,'Visible','off');
```

```
set(handles.uipanel18,'Visible','on');
```

```
uiopen('LOAD')
```

```
plot(handles.axes11,X(:,1),F(:,1),'LineWidth',2);
```

```
a=size(X);
```

```
for car=1:a(1,1)
```

```
sta(car,1)=X(car,1);
```

```
sta(car,2)=F(car,1);
```

```
set(handles.uitable3,'Data',sta);
```

```

end
save('case.mat', 'X', 'F');

% -----
function Untitled_10_Callback(hObject, eventdata, handles)
uipushtool5_ClickedCallback(hObject, eventdata, handles)

% --- Executes on slider movement.
function slider18_Callback(hObject, eventdata, handles)
i = uint8(get(hObject,'value'));
input_file = load('Matriz.dyn');
A1= input_file(1,1);
A2= input_file(1,2);
A3= input_file(1,3);
A4= input_file(1,4);
DX= input_file(1,5);
A= input_file(1,6);
E= input_file(1,7);
M= input_file(1,8);
N= input_file(1,9);
U= input_file(:,:);
if i > 2 && i < M
t=['DINAGRAMA EN EL NODO ',int2str(i)];
plot(handles.axes24,0)
plot(handles.axes24,-12*U(i,:), E*A/DX*(U(i,:) - U(i - 1,:)))
xlabel(handles.axes24,'POSICION -in'); ylabel(handles.axes24,'ESFUERZO -lbs-');
title (handles.axes24,t);
axis tight

```

```

else
    if i == M
        Fp = E*A/DX*(U(M+1,:) - U(M,:));
        Xp = -12*(U(M+1,:) - max(U(M+1,:)));
        hold on
        plot(handles.axes24,0,'r');
        plot(handles.axes24,Xp,Fp,'r');
        xlabel(handles.axes24,'POSICION -in'); ylabel(handles.axes24,'ESFUERZO -
lbs-'); title(handles.axes24,'DINAGRAMA EN BOMBA');
        axis tight
    end
end

```

```

function slider18_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
if isequal(get(hObject,'BackgroundColor'), get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor',[.9 .9 .9]);
end

```

```

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function text33_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to text33 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all CreateFcns called

```

```

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function text35_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to text35 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB

```

```
% handles empty - handles not created until after all CreateFcns called
```

```
% -----
```

```
function Untitled_1_Callback(hObject, eventdata, handles)
```

```
% hObject handle to Untitled_1 (see GCBO)
```

```
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
```

```
% handles structure with handles and user data (see GUIDATA)
```

```
% -----
```

```
function Herramienta_Callback(hObject, eventdata, handles)
```

```
% hObject handle to Herramienta (see GCBO)
```

```
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
```

```
% handles structure with handles and user data (see GUIDATA)
```


APENDICE B

Datos de las Cartas Dinográficas de Superficie

Caso 1

Posición	Esfuerzo
0,10168	4085,7
0,2756	3969,1
0,44953	3852,4
0,62278	3774,7
0,79604	3697
0,96729	3736
1,1379	3814
1,3084	3891,9
1,3071	3969,7
1,4777	4047,7
1,6503	4008,9
1,8235	3931,1
1,8249	3853,3
1,9981	3775,6
2,0001	3658,9
2,1734	3581,2
2,3453	3581,3
2,6878	3659,3
2,8584	3737,3
3,029	3815,2
3,1995	3893,1
3,1982	3970,9
3,3688	4048,9

Caso 2

Posición	Esfuerzo
0,41335	5311,2
1,4839	5578,2
3,2116	5800,9
4,7116	6156,9
5,7805	6446,1
7,0658	6757,5
7,9199	7002,2
9,4248	7291,5
10,5	7491,8
10,712	7580,8
12,657	7803,5
15,496	7737,6
17,035	7560,3
18,357	7360,7
19,897	7161,1
21,22	6961,4
22,319	6828,4
23,857	6673,3
24,081	6584,5
26,271	6451,7
28,237	6385,6
30,635	6386,3
32,808	6475,8

3,5394	4126,8
3,7099	4204,7
3,7086	4282,6
3,8792	4360,5
4,0491	4477,3
4,2197	4555,3
4,3903	4633,2
4,3896	4672,1
4,5595	4788,9
4,5582	4866,8
4,7287	4944,7
4,7267	5061,4
4,8973	5139,4
5,0672	5256,2
5,0659	5334
5,0646	5411,8
5,0625	5528,6
5,2331	5606,5
5,4037	5684,4
5,5736	5801,3
5,7442	5879,2
6,0874	5918,3
6,4312	5918,6
6,7757	5879,9
7,1202	5841,2
7,2915	5880,2
7,6346	5919,3
7,8052	5997,3
7,9758	6075,2

34,106	6609,5
36,277	6743,4
38,232	6832,8
40,191	6877,8
42,592	6834,1
44,343	6723,4
45,877	6612,7
47,415	6457,6
48,95	6324,7
50,486	6191,8
52,023	6036,7
54,433	5859,6
56,823	5971,3
58,559	6082,9
60,296	6172,3
61,814	6283,8
63,784	6173,3
63,581	5973,2
62,939	5795,3
62,077	5661,7
61,656	5461,6
60,571	5394,6
59,252	5549,8
58,152	5682,8
57,269	5838,1
56,382	6037,9
55,499	6193,2
54,404	6259,6
53,103	6170,3

8,1464	6153,1
8,145	6231
8,3156	6308,9
8,3143	6386,7
8,4842	6503,6
8,6548	6581,5
8,6534	6659,3
8,8233	6776,2
8,9939	6854,1
9,1645	6932
9,5077	6971,1
9,8522	6932,5
10,025	6893,7
10,369	6855
10,543	6777,3
10,887	6738,6
11,06	6699,8
11,232	6699,9
11,747	6739,1
12,09	6778,3
12,606	6778,6
12,949	6778,8
13,465	6779,2
13,98	6818,4
14,323	6896,4
14,321	6974,3
14,492	7052,2
14,662	7169
14,832	7285,9

52,239	6059
51,159	5925,3
50,077	5813,9
49,213	5702,6
48,567	5591,3
47,705	5457,7
46,623	5346,3
45,32	5279,3
43,132	5389,8
41,595	5544,9
39,84	5700
37,652	5810,5
35,905	5854,4
34,165	5809,5
32,212	5675,6
30,482	5497,4
28,97	5296,9
27,893	5118,9
26,818	4918,6
25,526	4696
24,239	4406,7
22,949	4161,9
22,092	3961,7
21,233	3783,7
20,154	3627,8
18,418	3516,2
16,671	3560,2
15,354	3693,2
14,028	3937,2

15,001	7441,6
15,17	7597,4
15,341	7675,3
15,511	7792,2
15,679	7986,8
15,849	8103,7
16,019	8220,5
16,189	8337,3
16,187	8454,1
16,529	8571
16,699	8649
16,87	8726,9
17,213	8766
17,558	8688,4
17,732	8610,7
17,905	8533
18,078	8455,3
18,251	8377,6
18,425	8261
18,599	8183,3
18,944	8105,7
19,288	8067
19,632	8067,2
19,975	8106,3
20,318	8145,5
20,662	8145,7
21,006	8145,9
21,351	8107,2
21,695	8068,5

12,485	4181,2
10,936	4491,9
9,8268	4758,3
8,7192	5002,4
7,6147	5202,1
5,8628	5312,7
3,6927	5178,8
2,3978	5000,7
1,7551	4844,9
0,90098	4600,3
0,033908	4533,3

22,04	8029,9
22,556	7991,3
22,9	7991,5
23,244	7991,7
23,588	7992
23,933	7914,4
24,278	7836,8
24,451	7759
24,624	7681,3
24,798	7603,6
24,972	7448,1
25,146	7331,5
25,319	7253,8
25,493	7137,2
25,667	7020,5
25,842	6865
26,017	6670,6
26,192	6515
26,366	6398,4
26,54	6281,8
26,713	6165,2
26,887	6048,6
27,061	5970,9
27,405	5932,2
27,748	5971,3
27,919	6049,2
28,09	6127,2
28,26	6205,1
28,431	6283

28,773	6361,1
29,116	6400,2
29,459	6439,3
29,976	6400,8
30,32	6362,1
30,665	6323,4
31,009	6323,6
31,353	6323,8
31,868	6363,1
32,212	6363,3
32,555	6363,5
32,899	6363,7
33,244	6325,1
33,416	6325,2
33,758	6403,2
33,929	6442,2
34,1	6520,2
34,271	6598,1
34,441	6676
34,612	6754
34,782	6870,8
34,952	6987,6
35,121	7143,4
35,291	7260,2
35,46	7416
35,628	7610,7
35,798	7766,4
35,967	7922,2
36,138	8000,1

36,308	8078
36,48	8078,1
36,825	8039,4
36,997	8000,6
37,17	7922,9
37,344	7845,2
37,517	7767,5
37,69	7689,8
37,863	7651
38,207	7612,3
38,551	7612,5
38,894	7651,7
39,065	7690,7
39,409	7690,9
39,926	7652,4
40,442	7613,8
40,786	7614
41,129	7653,1
41,473	7653,4
41,818	7575,8
41,991	7498
42,165	7420,3
42,338	7342,6
42,512	7226
42,686	7109,4
42,688	6992,7
42,862	6876
43,036	6720,5
43,212	6526,1

43,386	6370,5
43,388	6253,8
43,562	6137,2
43,736	6020,6
43,909	5981,8
44,252	6020,9
44,422	6098,8
44,593	6176,8
44,764	6254,7
45,106	6332,8
45,45	6333
45,966	6294,4
46,482	6294,7
46,826	6295
47,17	6295,2
47,686	6256,6
48,029	6334,6
48,199	6451,5
48,368	6568,3
48,366	6685,1
48,536	6801,9
48,706	6957,7
48,874	7152,3
48,872	7269
49,04	7502,6
49,21	7619,5
49,381	7697,4
49,725	7658,7
49,898	7581

49,9	7503,2
50,245	7425,6
50,589	7425,8
50,76	7464,8
51,276	7426,2
51,621	7387,6
51,965	7387,8
52,138	7310,1
52,312	7193,5
52,315	7037,8
52,321	6687,6
52,49	6843,4
52,492	6687,7
52,495	6532,1
52,669	6415,5
52,671	6298,7
52,673	6182
53,017	6182,2
53,361	6182,5
53,877	6182,8
54,046	6338,6
54,044	6416,4
54,042	6572
54,04	6688,7
54,037	6844,4
54,034	7038,9
54,032	7155,7
53,857	7311,2
53,689	7116,5

53,691	6999,8
53,693	6844,2
53,523	6727,3
53,698	6571,8
53,356	6454,8
53,186	6338
53,192	5987,8
53,023	5832,1
53,026	5676,4
52,858	5442,8
52,688	5326
52,518	5209,2
52,343	5364,7
52,168	5559,1
51,993	5714,7
51,819	5870,2
51,474	5947,8
51,131	5869,7
50,788	5830,6
50,445	5791,5
50,275	5674,6
50,104	5596,7
49,934	5518,8
49,591	5440,7
49,248	5401,6
48,903	5479,2
48,558	5556,8
48,215	5478,7
48,045	5361,9

47,876	5206,1
47,877	5128,3
47,708	5011,5
47,711	4816,9
47,542	4622,3
47,375	4349,8
47,207	4155,1
47,039	3882,6
46,87	3726,9
46,7	3610,1
46,186	3493
45,844	3414,9
45,329	3336,8
44,987	3258,7
44,472	3219,5
44,128	3219,3
43,612	3218,9
43,097	3179,7
42,755	3101,7
42,413	2984,7
42,414	2906,9
42,073	2751
41,732	2595,2
41,561	2517,2
41,391	2400,4
41,221	2322,5
40,877	2322,2
40,531	2438,7
40,357	2555,4

40,183	2672
40,01	2749,7
39,836	2866,3
39,663	2944
39,318	3021,6
38,974	3021,4
38,803	2943,5
38,462	2787,6
38,293	2631,8
38,124	2476,1
37,784	2242,4
37,444	2008,7
37,275	1814,1
37,105	1697,2
36,935	1619,3
36,42	1580
36,076	1579,8
35,732	1579,6
35,388	1579,4
35,044	1579,1
34,527	1656,6
34,011	1695,2
33,665	1811,7
33,319	1928,2
32,972	2122,6
32,626	2278
32,452	2394,6
32,106	2472,2
31,934	2511

31,59	2510,8
31,248	2432,7
30,906	2315,8
30,565	2159,9
30,223	2004
29,881	1926
29,365	1964,6
29,019	2081,1
28,672	2236,5
28,498	2392
28,323	2547,6
27,976	2741,9
27,801	2936,3
27,453	3130,6
27,107	3247,2
26,935	3286
26,762	3324,7
26,417	3402,3
25,901	3402
25,385	3440,6
24,87	3401,3
24,355	3362,1
23,84	3283,9
23,498	3205,9
23,328	3089,1
23,157	3011,1
22,987	2933,2
22,816	2855,3
22,646	2777,3

22,475	2699,4
22,132	2660,3
21,788	2660
21,444	2698,7
21,098	2815,2
20,751	3009,6
20,405	3126,1
20,059	3242,6
19,886	3281,4
19,542	3281,2
19,2	3203,1
19,029	3125,2
18,859	3008,3
18,518	2852,5
18,348	2735,6
18,178	2618,8
18,009	2502
17,839	2385,1
17,497	2268,2
17,326	2190,2
16,983	2151,1
16,468	2111,8
15,78	2111,4
15,265	2111,1
14,576	2188,4
14,23	2266
13,885	2382,5
13,71	2538,1
13,537	2615,8

13,363	2693,5
13,018	2810
12,844	2887,7
12,5	2926,4
12,157	2887,3
11,814	2809,2
11,644	2731,3
11,474	2614,4
11,303	2536,5
10,961	2458,5
10,617	2419,3
10,272	2496,9
10,099	2574,6
9,9257	2652,4
9,7518	2769
9,5772	2924,5
9,4026	3080
9,23	3118,8
9,0555	3274,4
8,8809	3429,9
8,7083	3468,7
8,535	3546,4
8,1905	3585,1
7,8453	3662,7
7,3289	3701,3
6,9851	3701
6,6412	3700,8
6,1262	3661,6
5,7857	3466,8

5,6158	3349,9
5,4458	3233,1
5,1034	3155,1
4,7588	3193,7
4,5856	3271,5
4,4117	3388,1
4,2377	3504,7
4,0638	3621,3
3,8912	3660,1
3,7186	3698,9
3,3755	3659,8
3,2056	3542,9
3,0357	3426,1
2,8664	3270,3
2,6965	3153,5
2,5273	2997,7
2,3573	2880,9
2,0149	2802,9
1,4998	2763,6
0,98267	2841,1
0,98067	2957,8
0,97866	3074,6
0,80474	3191,2
0,8034	3269
0,63014	3346,7
0,45822	3346,6
0,11439	3346,4