

**APROVECHAMIENTO DE VARIABLES ELÉCTRICAS PARA EL DIAGNÓSTICO  
Y DETECCIÓN DE FALLAS EN POZOS DE BOMBEO MECÁNICO**

**OSCAR FELIPE GAITÁN VILLEGAS**

**Código: 2003201265**

**DIEGO FERNANDO CÓRDOBA RAMÍREZ**

**Código: 2004102021**

**UNIVERSIDAD SURCOLOMBIANA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
PROGRAMA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA  
NEIVA - HUILA  
2010**

**APROVECHAMIENTO DE VARIABLES ELÉCTRICAS PARA EL DIAGNÓSTICO  
Y DETECCIÓN DE FALLAS EN POZOS DE BOMBEO MECÁNICO**

**OSCAR FELIPE GAITÁN VILLEGAS**

**Código: 2003201265**

**DIEGO FERNANDO CÓRDOBA RAMÍREZ**

**Código: 2004102021**

**Proyecto de grado presentado para optar  
al título de Ingeniero Electrónico**

**Director**

**CARLOS ALBERTO PEREZ CAMACHO**

**Ingeniero Electrónico**

**UNIVERSIDAD SURCOLOMBIANA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
PROGRAMA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA  
NEIVA, HUILA**

**2010**

Nota de aceptación:

---

---

---

---

---

---

---

Firma del presidente del jurado

---

Firma del primer jurado

---

Firma del segundo jurado

Neiva, 29 de Julio de 2010

A Dios todo poderoso por hacer esto posible;  
A mis padres Luis Carlos y Martha Cecilia;  
A mis hermanos Carlos y Cristian;  
A mí Abuelita linda que desde el cielo nos guía;  
A todos mis amigos y en especial a Johan que desde el cielo nos acompaña.

**OSCAR FELIPE GAITÁN VILLEGAS**

A Dios todo poderoso por hacer esto posible;  
A mis padres Orlando y Miralba y abuela Aura M.;  
A mis hermanos Darwin, Arley y Derly;  
A Juan José Córdoba G;  
A mis amigos y familiares.

**DIEGO FERNANDO CORDOBA RAMIREZ**

## **AGRADECIMIENTOS**

A todos nuestros familiares y amigos por toda su comprensión, apoyo incondicional, y porque depositaron toda su confianza en la formación universitaria nuestra.

A los ingenieros Diego Briñez, Fauricio Romero, Diego Pinto y Carlos Pérez por todo el tiempo dedicado y enseñanzas impartidas durante el desarrollo del proyecto.

A ECOPETROL-ICP y la Universidad Surcolombiana por la financiación de nuestro proyecto mediante el convenio 007/08.

A todos los profesores y compañeros que durante la carrera nos guiaron y compartieron todo su conocimiento en las diversas asignaturas e hicieron que fuera una época inolvidable.

## TABLA DE CONTENIDO

	Pág
INTRODUCCIÓN .....	16
1. UNIDAD DE BOMBEO MECÁNICO BALANCEADA POR AIRE .....	17
1.1 CARACTERÍSTICAS .....	18
1.2 VENTAJAS .....	18
1.3 DESVENTAJAS .....	18
1.4 BALANCEO .....	18
1.4.1 Balanceo con amperímetro .....	19
1.4.2 Balanceo con tablas de fabricante .....	20
1.4.3 Balanceo con programas de computadora .....	20
2. WELL ANALYZER .....	22
2.1 PRUEBA ACÚSTICA DE NIVEL DE LÍQUIDO .....	22
2.2 PRUEBA DINANOMÉTRICA .....	24
2.2.1 Transductor dinamométrico tipo herradura 4" (celda de carga) .....	25
2.3 PRUEBA DE POTENCIA - CORRIENTE .....	27
2.3.1 Transductor potencia-corriente .....	27
2.4 PRUEBA DE PRESIÓN .....	28
2.4.1 Transductor de presión .....	29
2.5 SOFTWARE TWM .....	30
3. ESTADO DEL ARTE DEL BALANCEO DE LA UNIDAD .....	31
3.1 ESTADO DEL ARTE DEL BALANCEO DINAMOMÉTRICO .....	31
3.2 ESTADO DEL ARTE DEL BALANCEO AMPERIMÉTRICO .....	32
3.2.1 Ventajas y desventajas .....	33
4. DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO .....	34
4.1 VISITAS REALIZADAS Y DATOS MEDIDOS EN CAMPO .....	34
4.1.1 Instalación y adquisición de datos de potencia con el Well Analyzer para unidades balanceadas por aire .....	34
4.1.1.1 Verificación de condiciones estables del pozo .....	34
4.1.1.2 Instalación sensores de corriente .....	37
4.1.1.3 Instalación sensores de voltaje .....	38
4.1.1.4 Conexión de los sensores al portátil del Well Analyzer .....	38
4.1.1.5 Adquisición del dato de corriente .....	38
4.1.2 Pruebas de presión .....	39
4.2 MÉTODOS PARA EL ÓPTIMO BALANCEO .....	45

4.2.1 Método 1. Balanceo amperimétrico .....	45
4.2.2 Método 2. Balanceo amperimétrico por ajuste de curvas .....	50
4.2.3 Método 3. Balanceo por medio del CBE .....	55
4.2.4 Método 4. Balanceo por delta de corriente experimental.....	55
5. ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	57
5.1 ANÁLISIS DE LOS MÉTODOS ENCONTRADOS PARA EL BALANCEO...57	
5.1.1 Método 1. Balanceo amperimétrico .....	57
5.1.2 Método 2. Balanceo por ajuste de curvas.....	57
5.1.3 Método 3. Balanceo por CBE .....	58
5.1.4 Método 4. Balanceo por delta de corriente experimental.....	58
6. VALIDACIÓN DEL SOFTWARE DESARROLLADO.....	59
7. DESARROLLO Y MANEJO DEL SOFTWARE DISEÑADO .....	64
8. CONCLUSIONES .....	71
9. RECOMENDACIONES .....	72
FUENTES DE CONSULTA.....	73

## LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Unidad de bombeo mecánico balanceada por aire	17
Figura 2. Ejemplos de gráficos de corriente para unidades fuera de balance y balanceadas	19
Figura 3. Equipo Well Analyzer	22
Figura 4. Diagrama de bloques del Well Analyzer	23
Figura 5. Análisis de los datos acústicos y de presión del casing	23
Figura 6. Carta dinagráfica	24
Figura 7. Ejemplo de la prueba dinamométrica	25
Figura 8. Transductor dinamométrico tipo herradura 4"	26
Figura 9. Prueba de potencia y corriente en el TWM	27
Figura 10. Transductor potencia-corriente	28
Figura 11. Prueba de presión en el TWM	29
Figura 12. Transductor de presión	29
Figura 13. TWM utilizado por el Well Analyzer.	30
Figura 14. Instalación de la celda de carga	31
Figura 15. Medición de corriente y voltaje	33
Figura 16. Instalación pistola para prueba de nivel	35
Figura 17. Prueba de nivel de fluido	35
Figura 18. Presión del casing	36
Figura 19. Instalación celda de carga	36
Figura 20. Carta dinagráfica de superficie y de fondo para el pozo DT-38	37
Figura 21. Instalación sensor de potencia	38
Figura 22. Gráfica de corriente y potencia del motor del pozo DT-38	39
Figura 23. Manómetro análogo y sensor de presión digital	40
Figura 24. Posiciones para medir presión	40
Figura 25. Aproximación para el pozo PG-24	43
Figura 26. Aproximaciones para los pozos PG-25, PG-12, PG-30, PG-08.	44
Figura 27. Corriente medida	45
Figura 28. Ubicación del instante del pico corriente	45
Figura 29. Ejemplo obtención de presión	46
Figura 30. Análisis de corriente para balancear	46
Figura 31. Análisis de presiones para balancear	47
Figura 32. Posición a la que se debe colocar la presión para balancear	48
Figura 33. Resultado del valor para balancear la unidad	49
Figura 34. Curva de Presión vs. Tiempo	50
Figura 35. Puntos seleccionados para la aproximación polinómica	50
Figura 36. Gráfica Corriente Ajustada mediante una función polinómica	51
Figura 37. Ejemplo obtención de presión a partir de corriente	52
Figura 38. Búsqueda del punto de corriente para balancear	52

Figura 39. Análisis de presiones para balancear	53
Figura 40. Resultado del valor para balancear la unidad	54
Figura 41. Especificaciones técnicas de presión para unidades Lufkin	55
Figura 42. Mediciones antes del balanceo	56
Figura 43. Mediciones después del balanceo	56
Figura 44. Corriente del motor durante un día de trabajo	59
Figura 45. Corriente del motor desbalanceado	60
Figura 46. Corriente del motor balanceado	60
Figura 47. Presión del cilindro durante un día de trabajo	61
Figura 48. Gráfica de potencia en ABU Balance	62
Figura 49. Gráfica de presión y corriente en ABU Balance	62
Figura 50. Gráfica antigua y nueva de corriente en ABU Balance	63
Figura 51. Paso 1. Selección del pozo	64
Figura 52. Paso1. Datos del pozo nuevo	64
Figura 53. Paso 2. Instalación del sensor de corriente	65
Figura 54. Paso 2. Adquisición de datos de presión	65
Figura 55. Paso 3. Adquisición del dato de corriente	66
Figura 56. Paso 3. Selección del archivo .PWR	66
Figura 57. Paso 3. Datos de la gráfica de corriente	67
Figura 58. Paso 4. Balanceo de la unidad	68
Figura 59. Paso 4. Balanceo de la unidad	68
Figura 60. Paso 4. Nueva gráfica de corriente	69
Figura 61. Paso 5. Reporte final	70
Figura 62. Tipos de carta dinagráfica	75
Figura 63. Informe proporcionado por Roddiag	76

## LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Datos de presión medidos	42

## LISTA DE ANEXOS

	Pág.
ANEXO A. Tipos de cartas dinagráficas	74
ANEXO B. Informe arrojado por el Roddiag	76

## **GLOSARIO**

**ANULAR:** Espacio entre dos círculos. En el caso de un pozo, es el espacio entre dos tuberías o entre una tubería y la pared del hueco.

### **API**

Instituto Americano del Petróleo

### **BALANCÍN**

Unidades de bombeo en superficie para la extracción de crudos desde el yacimiento.

### **BOMBA DE SUBSUELO**

Bomba de desplazamiento positivo instalada en el subsuelo para la extracción de crudo.

### **CABEZA DE CABALLO**

La pieza curva que encabeza la viga viajera de la unidad de bombeo. Sujeta una pieza de cable (Guaya) que agarra la sarta.

### **CABILLAS**

Elemento de conexión entre el equipo de superficie y de subsuelo.

### **CARTA DINAGRÁFICA**

Registro continuo que presenta las cargas instantáneas que actúan en la barra lisa durante el ciclo de bombeo.

### **CASING**

Es la tubería de revestimiento que protege el fluido de la perforación (lodo) en su descenso al pozo, protege también la tubería de producción y evita la salida de fluidos no deseables.

### **CW**

Sentido de rotación de la unidad de bombeo en sentido de las manecillas de reloj.

### **CCW**

Sentido de rotación de la unidad de bombeo en sentido contrario de las manecillas de reloj.

### **CBE**

Efecto de contrabalanceo. Es usualmente la carga necesaria en la barra lisa para mantener los brazos de la unidad de bombeo a 90 grados. (2) Una medición en campo de la carga en la barra lisa necesaria para mantener los brazos en su

ángulo correspondiente. Por ejemplo: El CBE es 10,500 libras en un ángulo de 95 grados. (3) Una forma indirecta de describir cuanta capacidad de contrabalanceo tienen los brazos y las contrapesas de una unidad.

### **CICLO DE BOMBEO**

Un ciclo completo ocurre cuando el cabezal de la unidad realiza un recorrido vertical completo tanto de subida como de bajada.

### **EMPACADURA**

Sistema que proporciona el sello entre la tubería de producción y el revestimiento.

### **NEMA**

National Electrical Manufacturers Association

### **POZO**

Punto de contacto comunicativo entre la superficie y el yacimiento, por el cual se extraen los fluidos existentes en la formación.

### **PRODUCCIÓN**

Volumen de fluidos producidos (Agua - Gas - Petróleo).

### **SLIPPAGE VARIATION (Variaciones en el deslizamiento de la correa).**

Es una medición relativa de la variación entre los deslizamientos que ocurren en las correas que enlazan el motor con la caja. Un valor de 1 indica que no hay deslizamientos entre las correas y las poleas, pero un valor muy pequeño indicaría que hay un alto deslizamiento.

### **SPM**

Strokes por minutos.

### **STROKE**

Golpe, equivale a un ciclo de bombeo.

### **TUBING**

Tubería que comunica el sistema de superficie con el de subsuelo, además de transportar los fluidos producidos cuando se produce por el espacio anular, o inyectados cuando se producen por el revestidor.

### **YACIMIENTO**

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

## RESUMEN

Este proyecto de grado se enfocó básicamente hacia el desarrollo de un software que permitiera llegar adecuadamente a un balanceo de las unidades balanceadas por aire en el bombeo mecánico utilizadas en ECOPETROL, teniendo en cuenta métodos como el eléctrico y como el análisis de torque. Para dicha tarea se implementó una herramienta muy útil la cual permite una medida precisa y mucho más fiable que la usada actualmente y que permite realizar análisis de corriente del motor para llegar a determinar el rango en el que se debe tener la presión en el cilindro para balancear la unidad.

Se llevaron a cabo pruebas de campo donde se tomaron mediciones de corriente variando la presión del cilindro para tratar de llegar a una aproximación de que proporción y relación existe específicamente entre la presión del cilindro y la corriente de la unidad motriz en el bombeo mecánico, que facilita el proceso de balanceo.

En el desarrollo del software se utilizó Visual Studio y se escribió en el lenguaje C#. Se utilizaron importantes librerías que permiten generar y encontrar funciones y relaciones matemáticas necesarias para los análisis; se consiguió crear un software fácil de manejar, funcional y donde se lleva la secuencia para realizar un adecuado balanceo paso a paso integrando varios métodos que permiten tener un mejor criterio a la hora del balanceo en las unidades. Por último se realizaron pruebas y comparaciones para diferentes pozos observando la diferencia entre los métodos convencionales con los que se hace el balanceo y las ventajas que se presentan al tener este programa.

## **ABSTRACT**

The project is focused basically to the developing of a software that can adequately achieve a balanced of the balancing air units in the rod pumping used in ECOPEPETROL, keeping in mind the methods such as electric method as the analysis of torque. For this issue was implemented a very useful tool which allows an accurate measurement and more reliable than the currently tool used and it allows us to make current analysis of the motor in order to determine the range in which it must have the cylinder pressure to balance the unit.

It took several field tests where current measurements were made by varying the cylinder pressure to achieve an approximation among proportion and specifically the relationship between cylinder pressure and the flow of the power unit in the rod pumping, which facilitates us the balancing process.

Software was developed in Visual Studio and it was programmed in C# language. It was built owing to main libraries that allow for generating and finding functions and mathematical relation required in the outcomes; we were able to create a user-friendly functional software, which has sequence for a proper balancing step integrating several methods that allow to have a better criterion at balancing the units. Finally, we carry out many proofs and comparisons, these ones were assessed within different wells, observing the difference among the conventional methods which makes the balance and the profits acquired using this software.

## INTRODUCCIÓN

El Bombeo mecánico es el método de levantamiento artificial más común, antiguo y ampliamente utilizado en la industria del petróleo. Usualmente es el más económico y fácil de mantener cuando es diseñado y operado apropiadamente.

Incrementar la eficiencia del sistema de bombeo mecánico ha sido siempre importante. Razón por la cual ECOPETROL S.A. se ha interesado por realizar investigaciones que conlleven a la optimización de los procesos; pues grandes ahorros e incrementos en la producción son posibles mediante el uso de tecnología moderna e implementación de hardware para el diagnóstico de fallas en el pozo, tales como desgaste de componentes del sistema, sobrecarga de la unidad motriz y en la caja reductora por desbalanceo del sistema.

Balancear una unidad es una tarea muy común y de gran importancia en la que se busca preservar el equilibrio energético durante el ciclo de bombeo; ya que una unidad fuera de balance puede sobrecargar el motor y la caja reductora generando fallas costosas y pérdidas en la producción. Aunque en la práctica el balanceo perfecto es raramente alcanzado, es importante mantener la unidad tan cerca de estarlo como sea posible y para esto se debe hacer un análisis de torque o registrar un gráfico de corriente del motor en la carrera ascendente y descendente.

Este proyecto estará dirigido básicamente al estudio y evaluación de alternativas para realizar un balanceo óptimo en las unidades de tipo balanceadas por aire en bombeo mecánico, teniendo en cuenta métodos existentes tales como el eléctrico y el dinamométrico. De igual forma implementar herramientas útiles con las que se cuentan actualmente y que no se aprovechan de la mejor forma.

## 1. UNIDAD DE BOMBEO MECÁNICO BALANCEADA POR AIRE

La unidad de bombeo mecánico balanceada por aire, es uno de los métodos de levantamiento artificial más antiguo y ampliamente utilizado en la industria petrolera. Fue desarrollado en 1920 a partir de una unidad convencional ubicando el cabeza de caballo sobre la parte móvil del vástago viajero.

La función del sistema de bombeo mecánico balanceado por aire, es transmitir la potencia hasta la bomba de subsuelo con el fin de extraer los fluidos del yacimiento hasta la superficie; para esto se convierte el movimiento rotacional del motor en un movimiento ascendente y descendente.

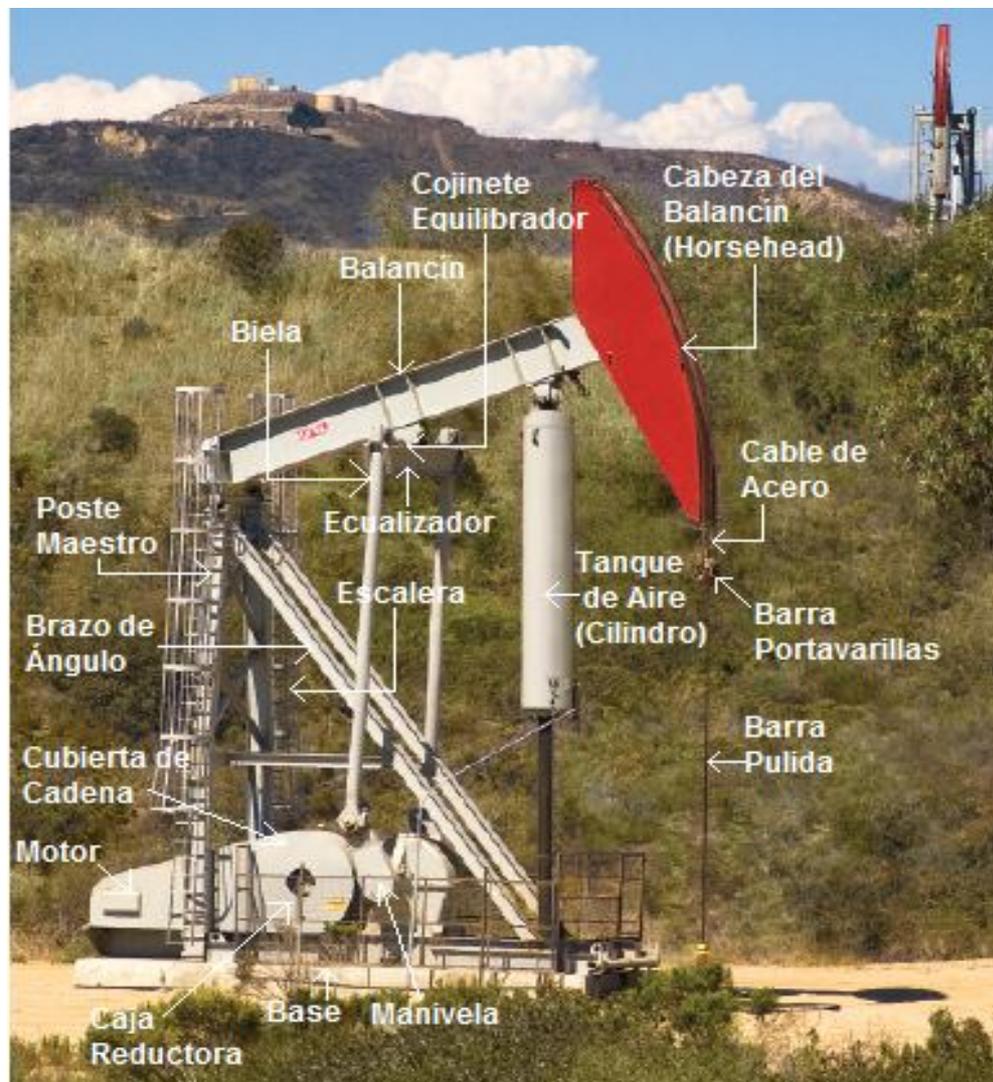


Figura 1. Unidad de bombeo mecánico balanceada por aire

En la figura 1 se muestra una unidad balanceada por aire, la cual está conformada por un equipo en superficie y uno en subsuelo. El equipo de superficie incluye la unidad motriz (motor eléctrico o a Gas), la unidad de bombeo, una barra lisa, una caja prensa estopas, cabezal de pozo y las líneas de flujo. El equipo de subsuelo incluye el revestimiento, tubería de producción, la sarta de varillas y la bomba de subsuelo, además de diferentes accesorios.

### **1.1 CARACTERÍSTICAS**

- El balancín de trabajo es una palanca de brazo sencillo (sistema clase III), ya que la cabeza de caballo y el brazo (Pitman) están sobre el mismo lado del balancín.
- El contrabalanceo está asegurado por la fuerza de presión del aire comprimido contenido dentro de un cilindro, que actúa como un pistón conectado al balancín.
- La unidad puede ser manejada en ambas direcciones.

### **1.2 VENTAJAS**

- Es más compacta y de fácil balanceo comparado con otro tipo de unidades.
- Los costos de transporte son muy bajos respecto a otro tipo de unidad (debido a su bajo peso).
- Disponible en tamaños más grandes con respecto a otras unidades.
- Pueden rotar CW o CCW.

### **1.3 DESVENTAJAS**

- Es más compleja y requiere mayor mantenimiento (aire comprimido, cilindro de aire, etc.).
- La condensación de agua en el cilindro de aire puede causar problemas.
- La caja reductora puede averiarse si el cilindro de aire pierde presión.

### **1.4 BALANCEO**

El contrabalanceo ayuda a reducir el torque que la caja reductora debe suministrar para operar la unidad. Sin embargo, solo colocando aire en el cilindro no es suficiente para minimizar el torque neto sobre la caja. Su tamaño y capacidad de presión determina si reducen o por el contrario incrementan el torque sobre la caja. Idealmente, se quiere tener suficiente contrabalanceo para minimizar las cargas sobre la caja reductora. Esto es lo que se hace para "balancear la unidad". La unidad puede balancearse ajustando la presión del aire de manera que el torque pico de la caja en la carrera ascendente sea igual al torque pico de la caja en la carrera descendente.

El balanceo de la unidad es muy importante para extender la vida útil de la caja reductora y para reducir el tamaño de la unidad motriz y por ende el consumo de energía. Debido a que balancear la unidad ayuda a minimizar el torque neto sobre la caja, no siempre reduciría el consumo de energía. Algunas veces, cuando se balancea la unidad, el consumo eléctrico aumenta ligeramente. Si la unidad está significativamente fuera de balance entonces frecuentemente el consumo de energía disminuirá. Aunque en la práctica el balanceo perfecto es raramente alcanzado, es importante mantener la unidad tan cerca de estarlo como sea posible. Una vez que la

unidad se encuentra balanceada, esta permanecerá así hasta que algo cause un cambio en las cargas sobre la barra lisa. Razones por las que una unidad queda fuera de balance incluyen: cambios en el nivel de fluido, desgaste de la bomba, acumulación de parafinas, rotura de cabillas, etc.

Una unidad “sobre balanceada” tiene más contrabalance del que realmente necesita. Esto significa que hay mucho aire en el cilindro y está haciendo más contrabalance del que necesita. Una unidad “Bajo balance” no tiene suficiente contrabalance. Esto significa que la presión que suministra el cilindro es demasiado baja.

En pozos someros de alta producción, donde son necesarias emboladas largas, podría no ser necesario un gran contrabalanceo. Esto es debido a que las cargas en la barra lisa son usualmente más bajas comparadas con pozos profundos. En estos casos las unidades de bombeo son frecuentemente utilizadas con cilindros pequeños a bajas presiones.

Es importante entender que el balanceo de la unidad depende de ambas cosas: el momento de contrabalance y de las cargas en la barra lisa. Una unidad balanceada permanecerá balanceada solo si la carta dinagráfica no cambia. Si las cargas en la barra lisa cambian debido a cambios en el nivel de fluido, desgaste en la bomba, acumulación de parafinas, etc., entonces la unidad podría irse fuera de balance nuevamente. Pozos con cambios rápidos de las condiciones de fondo debido a repuestas por inundación de agua, inyección de vapor, etc. Deberían monitorearse y balancearse con frecuencia para prevenir fallas en la caja y altos costos por consumo eléctrico.

#### 1.4.1 Balanceo con amperímetro

El método más común para balancear la unidad es usando un amperímetro que brinde la opción de graficar los resultados. El amperímetro es conectado a los cables del motor y se mide el amperaje trazado por el motor durante un ciclo de bombeo. La corriente eléctrica dibujada por el motor es proporcional al torque sobre la caja reductora.

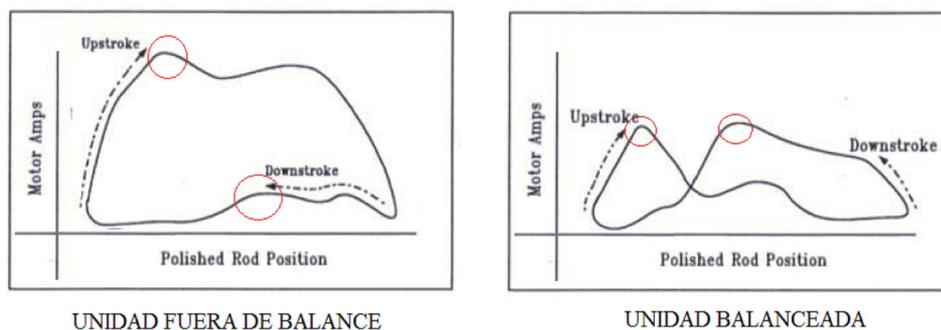


Figura 2. Ejemplos de gráficos de corriente para unidades fuera de balance y balanceadas

Si el amperaje pico leído en la carrera ascendente es cercanamente igual al de la carrera descendente entonces la unidad estará balanceada. Si no es así, la unidad deberá detenerse, se suministrará o extraerá presión al cilindro de las unidades y nuevamente se revisaran los picos de corriente en ambas carreras hasta que ambos sean iguales o muy similares. En este punto la unidad se considerara balanceada.

#### **Ventajas y desventajas de balancear la unidad con el método de amperaje**

Para mayor exactitud, puede usarse el amperímetro para obtener un gráfico de amperaje vs. posición de la barra lisa. El amperímetro se conecta al sistema dinamométrico. Puede usarse para grabar la carta dinagráfica y el gráfico de corriente, ambos en la misma hoja de papel.

Si los picos de corriente en la carrera ascendente y descendente son diferentes entonces deberá detenerse la unidad y suministrar o extraer aire del cilindro. Luego deberá arrancarse la unidad y grabar otro gráfico de corriente. Si la unidad todavía no está balanceada se tendrá que repetir el proceso hasta que ambos picos sean iguales. Esto podría tomar un largo tiempo dependiendo del tamaño de la unidad y longevidad de la misma.

#### **1.4.2 Balanceo con tablas de fabricante**

Una manera más precisa de averiguar si la unidad esta balanceada es grabar una carta dinagráfica y realizar un análisis de torque. Para encontrar cuanto momento de contrabalance se necesita para balancear la unidad requiere un esquema de iteración. Esto se hace variando el máximo momento de contrabalance usado para calcular el torque neto hasta que el torque pico de la carrera ascendente y descendente son los mismos. Debido al gran número de cálculos requeridos, este método es solo práctico con un computador.

Una vez conocido el máximo momento de contrabalanceo pueden utilizarse los gráficos o tablas de los fabricantes de unidades para decidir la presión a la cual la unidad estará balanceada.

#### **1.4.3 Balanceo con programas de computadora**

El balanceo de unidades de bombeo puede simplificarse usando programas que están específicamente diseñados para este propósito. Uno de estos programas es el Cbalance y ha sido desarrollado por Theta Enterprise. CBalance es utilizado para el balanceo de unidades con pesas, y contiene data de manivelas y contrapesas para la mayoría de las unidades de bombeo comúnmente utilizadas. Permite obtener data de contrabalance sin la necesidad de medidas de campo y para este tipo de unidades calcula la nueva posición requerida de las contrapesas para balancear la unidad en un solo paso.

Roddiag constituye un programa predictivo que utiliza la ecuación de onda para realizar sus cálculos para efecto de balancear la unidad. En este programa es cargado con datos básicos como la carta dinográfica, presión máxima del cilindro y presión en el tubing. Posteriormente el software lo que hace es calcular el efecto de contrabalance y determinar cual es la presión máxima adecuada para que la unidad este balanceada.

Estos programas son una herramienta muy útil debido a que permiten:

- Minimizar el tiempo y los gastos requeridos para balancear la unidad de bombeo.
- Maximizar el tiempo de vida de las cajas de engranaje.
- Elimina la necesidad de medir en el campo el efecto de contrabalanceo.
- Elimina el riesgo de lesión durante la medición el efecto de contrabalanceo (Encadenando la unidad), etc.

## 2. WELL ANALYZER



Figura 3. Equipo Well Analyzer

El Well Analyzer es un instrumento computarizado para adquirir datos acústicos, tales como nivel del líquido y el transiente de presión e igualmente datos dinamométricos, datos de potencia y corriente; en un paquete compacto. Este equipo consiste en un computador portátil y un paquete electrónico robusto. El computador controla la adquisición de datos, los procesa, los analiza y muestra los resultados a través del software TWM que esta grabado en el disco duro del computador y se carga automáticamente en la memoria, esta diseñado para ser usado de la manera más simple posible.

En la siguiente pagina se puede observa un diagrama de bloques del Well Analyzer.

### 2.1 PRUEBA ACÚSTICA DE NIVEL DE LÍQUIDO

El Well Analyzer usa un montaje que consta de una pistola de gas y un transductor de presión. El transductor de presión permite una más rápida y acertada determinación del aumento de la tasa de presión del casing la cual es necesaria para determinar el flujo de la tasa de gas del casing. El computador utiliza los datos acústicos y los datos crecientes de presión del casing en conjunto con la base de datos del Well Analyzer para hacer el análisis.

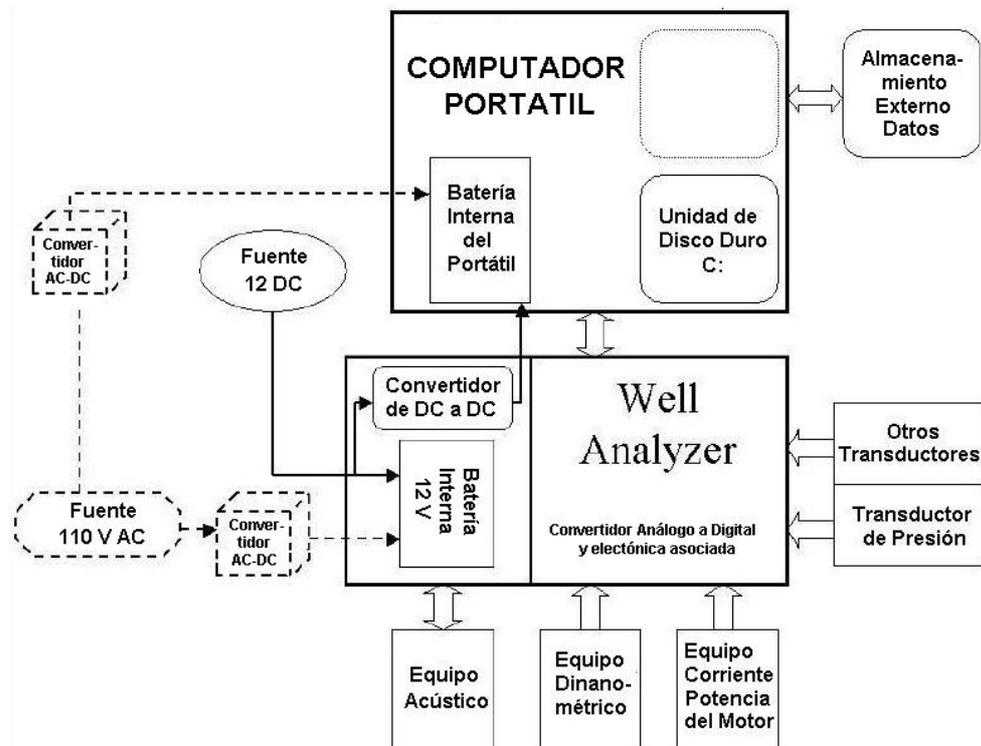


Figura 4. Diagrama de bloques del Well Analyzer

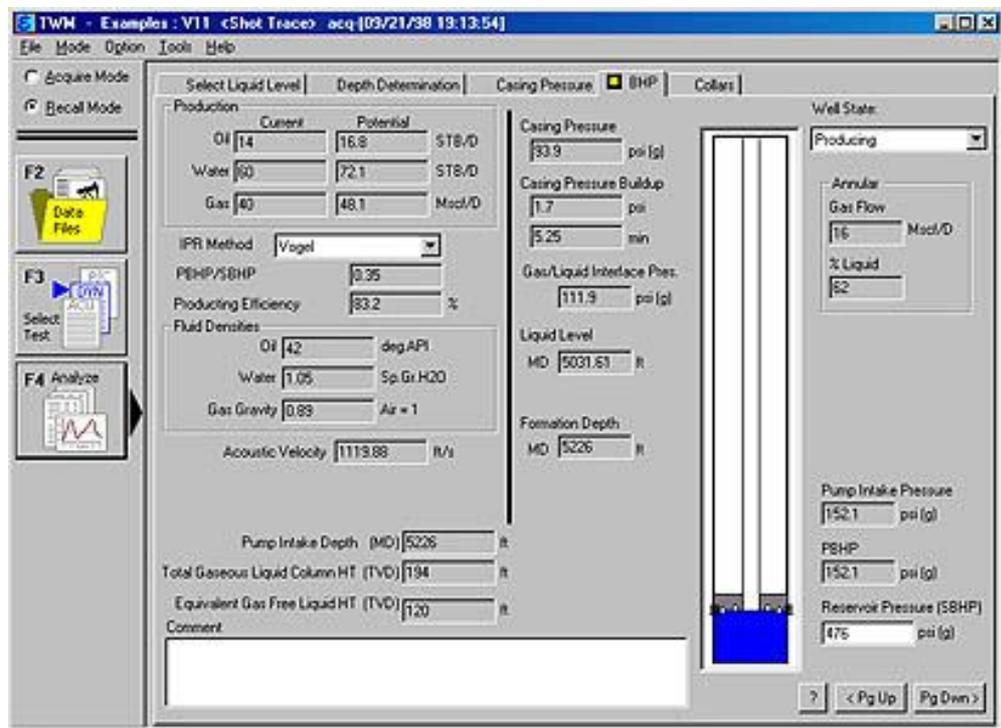


Figura 5. Análisis de los datos acústicos y de presión del casing

## 2.2 PRUEBA DINANOMÉTRICA

El sistema dinamométrico registra las cargas sobre la barra lisa (fuerzas) como una función de la posición de la barra. Este es llamado usualmente “Carta Dinagráfica ó Dinagrama”. Dependiendo del sistema usado, es igual un grafico X-Y en una hoja de papel, o un registro electrónico de los puntos de Cargas vs. Posición. Un sistema dinamométrico moderno tiene una celda de carga, un transductor de posición, y un sistema de grabación.

La carta dinagráfica es una herramienta que puede usarse para mejorar la eficiencia y reducir la tasa de fallas en pozos bombeando. Por ejemplo, puede calcularse el torque en la caja reductora, detectar problemas con la bomba de subsuelo, o determinar las cargas tensionales en las cabillas. También puede usarse para chequear la integridad de las válvulas tanto fija como viajera, medir el efecto de contrabalance, y registrar el consumo eléctrico del motor vs. la posición de la barra lisa.

Pueden encontrarse muchos problemas en sistemas de bombeo a través del análisis de la carta dinagráfica usando programas modernos de computadora tales como el RODDIAG, XDIAG o TWM.

Muchas fallas se pueden detectar mediante la carta dinagráfica. Para cada problema en el sistema se obtendrá determinada forma de la carta; razón por la cual existen formas de cartas ya establecidas para los problemas que puedan presentarse. Ver Anexo A.

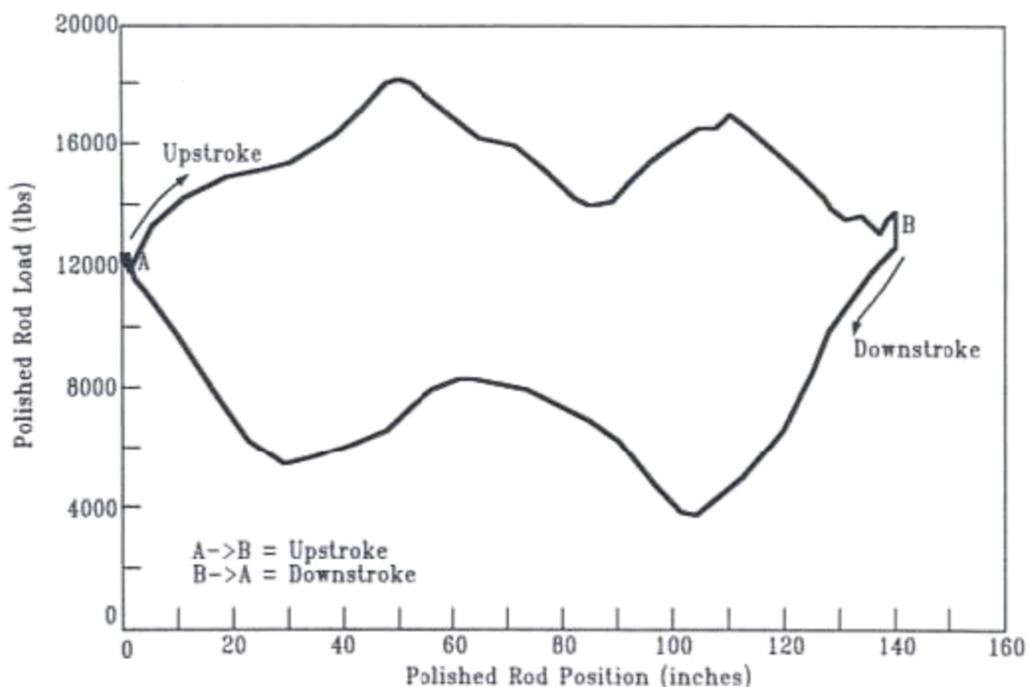


Figura 6. Carta dinagráfica

El Well Analyzer es usado con una celda de carga para recolectar el dato dinamométrico el cual es procesado y analizado para determinar la carga y el rendimiento de la unidad de superficie, sarta de varillas, y la bomba del pozo.

El transductor de la barra lisa está conectada a esta por debajo de la viga viajera. Generalmente, la unidad de bombeo puede estar operando durante la instalación del transductor de la barra lisa. El transductor tipo herradura es una celda de carga muy exacta para la realización de un análisis dinamométrico más completo incluyendo medición precisa de la carga de las válvulas y análisis mecánico del torque o par de la unidad motriz.

El acelerómetro integrado en ambos dinamómetros proporciona una compacta, cómoda y barata técnica para determinar la posición de la barra lisa y el dinagráma de superficie trazando una gráfica de carga vs. posición. El dinagráma de fondo es calculado para determinación del rendimiento de la bomba.

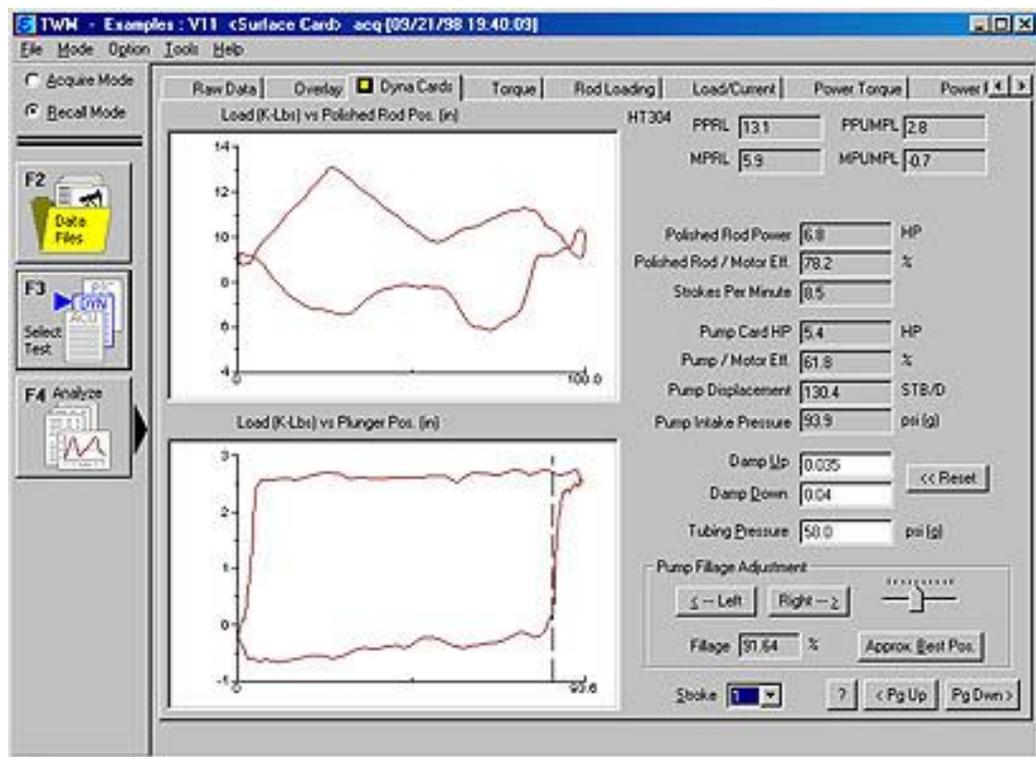


Figura 7. Ejemplo de la prueba dinamométrica

### 2.2.1 Transductor dinamométrico tipo herradura 4" (celda de carga)

Un transductor de herradura de 4" se utiliza para medir con exactitud la carga de la barra lisa, al igual que su posición. El transductor de herradura se instala en la barra lisa de la unidad de bombeo. Para instalar el transductor de herradura, se posiciona una grapa temporal sobre la barra lisa cerca de 4" por encima del protector, cuando la

barra lisa está en la parte inferior de la carrera descendente. El transductor de herradura también es conocido como celda de carga y también los hay de 5”.



Figura 8. Transductor dinamométrico tipo herradura 4”

La celda de carga mide con mucha exactitud la carga sobre la barra lisa usando 12 medidores de tensión que se montan sobre tres miembros de apoyo. La celda de carga también incluye un acelerómetro. Datos de aceleración son obtenidos usando el mismo cable a través del cual se obtienen las mediciones de carga. Un transductor de posición no es necesario ya que el pequeño acelerómetro está integrado en la celda de carga. El acelerómetro es un dispositivo de estado sólido y no requiere mantenimiento de rutina. Los datos de aceleración son integrados dos veces en el software para determinar la posición de la barra lisa como mediciones de carga.

El transductor de herradura mide con exactitud la carga de la barra lisa y posición. Estos datos son procesados por el software del Well Analyzer para obtener la carta dinamométrica de superficie y la carta de subsuelo. Las cargas y requerimientos de potencia de la carta dinográfica de superficie y la carta de subsuelo son mostrados en el análisis del software. Una prueba de válvula viajera y válvula fija puede ser realizada. La prueba de válvula fija mide la carga de la barra lisa cuando dicha barra esta soportando el líquido en el tubing. Dichas pruebas son para verificar el correcto funcionamiento de las válvulas, detectar fugas o desgaste de dichas válvulas, igualmente verificar el funcionamiento de la bomba de subsuelo. Así mismo la carga de la caja reductora es calculada por el software usando tanto la carga como la posición de la barra lisa. Las cargas de la caja reductora y un diagrama de cargas permisibles son calculados y mostrados en la pantalla. Para efecto de balanceo de la unidad de bombeo, el software utilizando las propiedades de la unidad determinará la posición de los contrapesos para efecto de balanceo; esto en el caso de unidad balanceada con peso.

Antes de llevar a cabo las mediciones con el transductor de herradura o celda de carga, este se calibra para obtener las mejores mediciones y garantizar los resultados obtenidos.

### 2.3 PRUEBA DE POTENCIA - CORRIENTE

El transductor de potencia mide tanto la potencia como la corriente del motor. El dato de potencia es procesado para determinar los costos eléctricos, el torque de la caja reductora y la distancia de las contrapesas necesarias para balancear la unidad de bombeo (cuando la unidad de bombeo es balanceada por contrapesas); al igual que el tamaño mínimo recomendado para el motor. El dato de corriente es procesado para obtener la carga amperimétrica. Un análisis de torque es mostrado además del análisis actual.

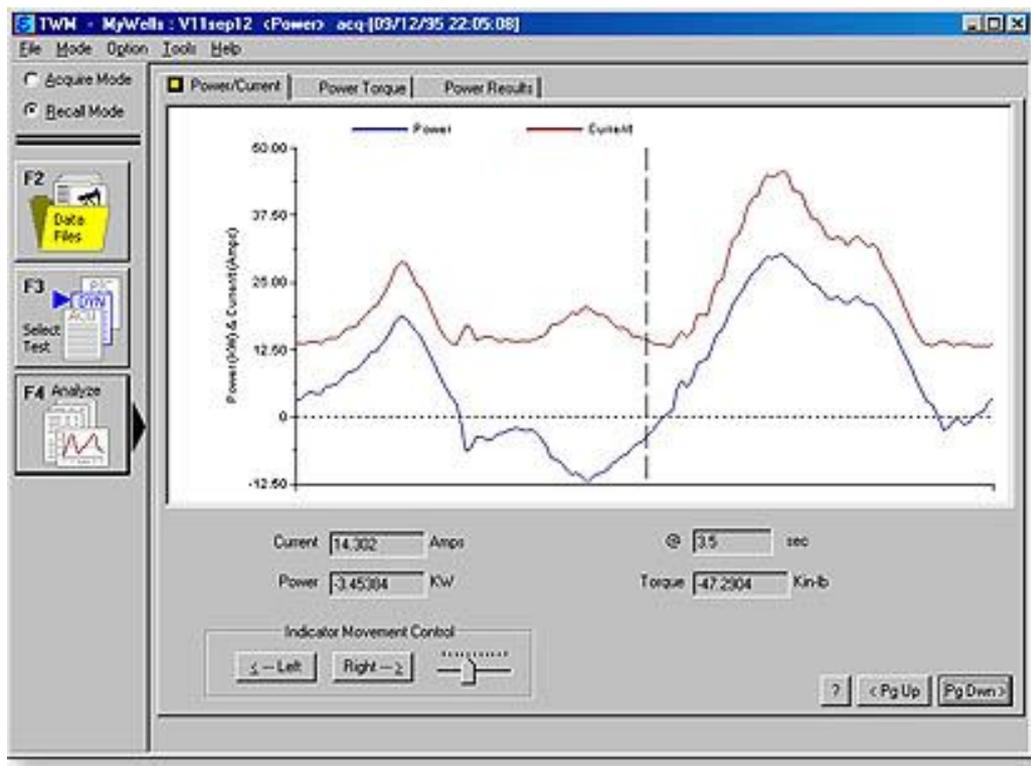


Figura 9 Prueba de potencia y corriente en el TWM

#### 2.3.1 Transductor potencia-corriente

El transductor de potencia - corriente se utiliza para la medición de la potencia y corriente del motor. La cantidad de energía que utiliza el motor se puede medir y comparar con la cantidad de potencia teórica necesaria para elevar el líquido de fondo, teniendo en cuenta el nivel de líquido, (obtenido a partir de la prueba acústica de nivel de líquido) para determinar una eficiencia global del sistema. Esto es muy importante para la determinación de los pozos que son candidatos para un mejor funcionamiento.

El transductor de potencia mide el uso de la potencia instantánea del motor y estos datos son digitalizados. La potencia consumida y la generada por el motor son medidas y registradas. Estos datos son analizados para determinar el tamaño del motor adecuado, la carga del motor y el costo de la electricidad suministrada al motor.

Los datos de potencia pueden ser analizados más a fondo para determinar el torque instantáneo del motor. Estos pueden ser convertidos al torque de la caja reductora por software aplicado la eficiencia y la velocidad de la unidad de bombeo que es determinada por el software. El par de la caja reductora en la carrera ascendente y descendente es calculado. El balanceo de la unidad de bombeo es fácil usando el equipo de medición de potencia.

El transductor de potencia - corriente se compone de tres sondas de tensión que se adjuntan a los tres cables al motor. Dos transductores de corriente son instalados alrededor de dos de los tres cables de la alimentación del motor. El transductor de potencia - corriente es compacto y tiene unas dimensiones aproximadas de 8" x 12" x 8". La alimentación del motor no necesita ser eliminado o modificado de alguna manera para instalar el transductor de potencia - corriente.



Figura 10. Transductor potencia-corriente

## 2.4 PRUEBA DE PRESIÓN

El Well Analyzer con la opción de presión transitoria puede ser usado para determinar el aumento de presión. El operador programa el Well Analyzer para adquirir los de datos. La rata de crecimiento puede ser especificada tanto en disparos por hora o en disparos por ciclo registrado. Numerosos diagnósticos y análisis son disponibles incluyendo presión del casing vs tiempo, nivel del liquido vs tiempo, presión del bottomhole vs. Tiempo, impresión de registro – registro derivativo, Homer Plot, MDH plot y curvas de flujo tipo radial. Visualización en tiempo real asegurando que los

pozos sean devueltos a la producción tan pronto como las pruebas se han sido alcanzadas.

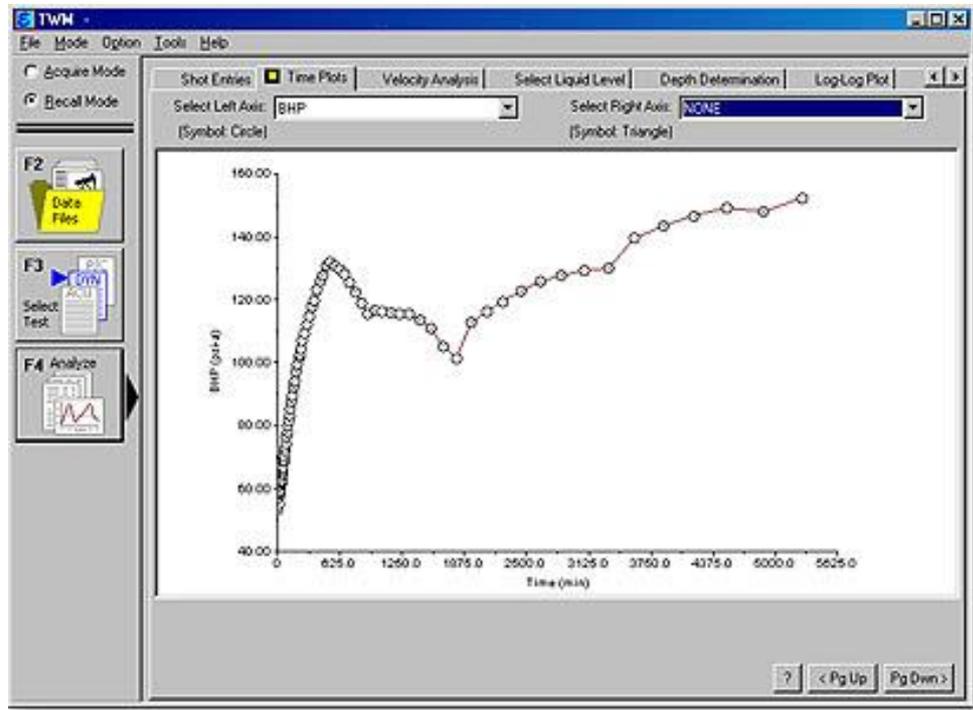


Figura 11. Prueba de presión en el TWM

#### 2.4.1 Transductor de presión



Figura 12. Transductor de presión

El transductor de presión utiliza un sensor de una fina película de acero inoxidable. Este tipo común de transductor es robusto y ofrece una buena precisión en una amplia gama de temperaturas. Para lo anterior el transductor de presión también contiene un termistor que mide la temperatura del transductor. Este transductor es calibrado en un rango de  $-40^{\circ}\text{F}$  a  $140^{\circ}\text{F}$ . Las correcciones de temperatura se aplican automáticamente por el software.

El transductor de presión es un dispositivo resistente. Las dimensiones son de 1"x 5" de longitud. La instalación es O-ring sellado para que apretado a mano sea suficiente para evitar fugas. El cable de presión transitoria y los conectores del transductor de presión son resistentes al agua.

El transductor de presión es originalmente calibrado en un amplio rango de temperaturas. Los coeficientes son puestos de manera permanente en la etiqueta del transductor de presión y se utilizan en los cálculos de software. El transductor de presión puede ser fácilmente puesto en cero al comienzo de cada prueba. El transductor de presión y la electrónica asociada, debe tener una estabilidad para la medición con una resolución de 0,1-PSI para un transductor de presión de 1.500 PSI. Para mejorar la resolución hay una variedad de transductores de menor rango. Una resolución exacta de este transductor es necesaria en la medición de la presión del casing.

Los transductores de presión están disponibles en los rangos de 375, 900, 1500, 3000 y 6000 PSI. Transductores de presión con presiones nominales superiores a 6000 PSI están disponibles por pedido especial. La gama 1500 PSI normalmente se suministra con el Well Analyzer a menos que el cliente solicite un rango diferente.

## 2.5 SOFTWARE TWM

El Well Analyzer es controlado por un software de fácil uso. El software controla la electrónica, adquiere los datos, calcula las presiones del bottomhole y las cargas sobre las varillas, construye gráficas de los análisis de presión y de las cartas dinagráficas.

El software también puede ser instalado en un computador de escritorio para permitir que los datos de campo sean revisados y analizados en la oficina. Los resultados son impresos en un formato para informes excelente.

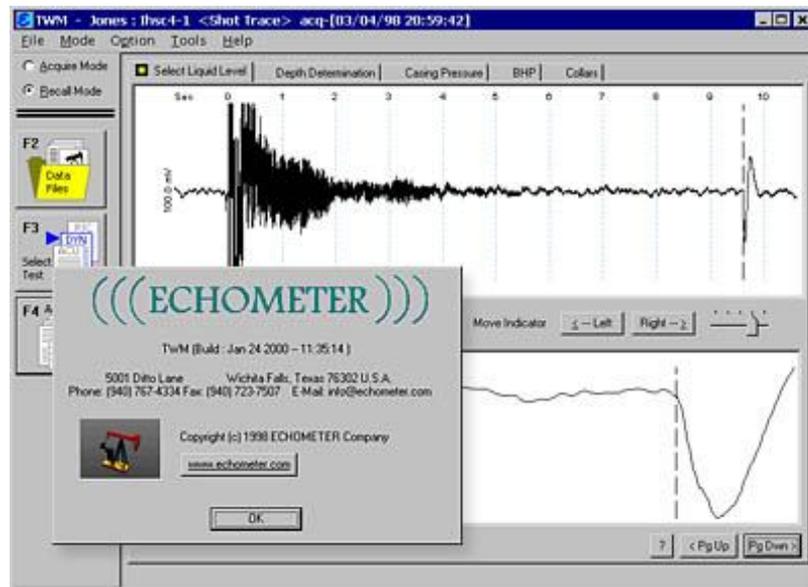


Figura 13. TWM utilizado por el Well Analyzer.

### 3. ESTADO DEL ARTE DEL BALANCEO DE LA UNIDAD

#### 3.1 ESTADO DEL ARTE DEL BALANCEO DINAMOMÉTRICO

Actualmente los ingenieros de producción de la empresa contratista respectiva, son los encargados de llevar a cabo las respectivas pruebas para el balanceo de la unidad mediante la carta de dinagrama y el software Rodiag, para el caso de las unidades balanceadas por aire y el software Cbalance para unidades convencionales.

Los pasos que se siguen en este proceso son los siguientes:

##### 1) Toma de nivel de fluido

Inicialmente los ingenieros revisan todos sus dispositivos a utilizar y verifican que todos este en buen estado y adecuadamente calibrados.

Posteriormente proceden a tomar el valor de presión del tubing observado en el respectivo manómetro, igualmente toman el valor de presión del cilindro de la unidad, tanto valor mínimo como el máximo.

Luego se procede a la instalación de la pistola de gas, los respectivos cables tanto para accionar la onda como para adquirir los datos como tal. Una vez todo este correcto, el ingeniero toma la prueba con el software TWM y se graba en este.

##### 2) Toma de dinagrama

Lo primero que se hace en este caso es la instalación de la celda de carga. A  $\frac{3}{4}$  de la carrera descendente la unidad es apagada y posteriormente frenada. Por medio del adecuado procedimiento la celda de carga es instalada y el respectivo cable conectado por un lado a la celda de carga y por el otro al portátil del equipo Well Analyzer. Una vez instalada correctamente la celda de carga, se procede a poner en normal funcionamiento la unidad y se realiza la toma del dinagrama por medio del software TWM y se guarda el registro para posteriores análisis.

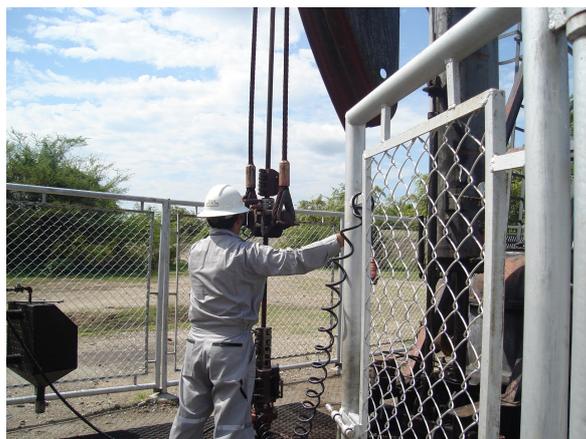


Figura 14. Instalación de la celda de carga

### 3) Prueba de Válvulas

En esta parte lo que se hace es verificar el correcto funcionamiento de la válvula viajera y la válvula fija. A los  $\frac{3}{4}$  de la carrera ascendente la unidad se detiene y por medio del TWM se verifica que la carga registrada por la celda de carga se mantenga y no disminuya, significando que esta no tiene fuga. De forma parecida a los  $\frac{3}{4}$  de la carrera descendente la unidad se detiene para verificar la válvula fija, se observa si la carga se mantiene o de lo contrario aumenta o disminuye y se determina su estado.

### 4) Balanceo con el software Rodiag

Una vez realizadas las anteriormente mencionadas pruebas se procede a ingresar los resultados al Rodiag; allí se carga el dinagrama medido, al igual que el nivel de fluido y las presiones del cilindro observadas. Finalmente el Rodiag analiza la información que se le suministra y determina si la unidad está desbalanceada o no, por medio de la carta dinográfica y la gráfica de torque de la caja reductora.

El Rodiag arroja un informe indicando el estado de la unidad de bombeo; informa a qué porcentaje de su capacidad está trabajando la caja reductora y el motor. Igualmente dice qué presión existe actualmente en el cilindro de la unidad de bombeo y establece el valor de la presión del cilindro a la cual la unidad se balancea. Ver Anexo B.

## 3.2 ESTADO DEL ARTE DEL BALANCEO AMPERIMÉTRICO

Procedimiento realizado por la parte eléctrica en ecopetrol

- 1). Los técnicos se dirigen a la caja de conexiones en donde se encuentra ubicado todo el control correspondiente al motor.
- 2). Abren dicha caja y verifican inicialmente los voltajes entre fase y fase, es decir entre las fases 1-2, 1-3 y 2-3, al supervisar que estos voltajes son similares prosiguen con la medida de la corriente en cada fase.
- 3). Instalan la pinza amperimétrica en una de las fases y toman cuatro mediciones de corriente para diferentes posiciones de la manivela como se muestra en la figura 15 en la siguiente página.

Con la información encontrada y los resultados de las corrientes, analizan lo que ocurre en las posiciones 3 y 4. Entonces si 3 y 4, es decir cuando los picos en la carrera ascendente y descendente de corriente no difieren en más del 10% toman como si esta unidad se encuentra balanceada, pero si por el contrario la diferencia entre estos dos valores excede el 10% se considera que la unidad está fuera de balance.

- 4). Teniendo en cuenta si la unidad está o no BALANCEADA, se toman las decisiones pertinentes. Para el caso de estar BALANCEADA simplemente la dejan intacta. Sin embargo si está FUERA DE BALANCE entonces llaman al recorredor de pozos y hacen cambiar el valor de la presión del cilindro para cambiar el efecto que este produce e intentar balancear la unidad. Es aquí donde NO se tiene un criterio

específico para saber cuanto aire se debe incrementar o extraer del cilindro, y hacia esta parte esta enfocado este proyecto de grado, para darles una aproximación con criterio de cuanto se debe variar la presión para obtener el resultado de corriente y se haga un óptimo balanceo y no sea al ensayo y error.

### 3.2.1 Ventajas y desventajas

El balanceo amperimétrico es simple pero en ocasiones puede no ser preciso. Teniendo en cuenta que se han tomado los datos con un amperímetro tradicional en cuatro puntos, no se garantiza que en dichos puntos se tengan realmente los valores máximos (picos) pues no estamos obteniendo una gráfica como tal de lo que ocurre realmente con la corriente en el ciclo completo de bombeo.

Este balanceo consume demasiado tiempo debido a que la unidad es balanceada por ensayo y error. Si los picos de corriente en la carrera ascendente y descendente son diferentes entonces deberá detenerse la unidad y cambiar la presión existente en el cilindro. Luego deberá arrancarse la unidad y grabar otro gráfico de amperaje. Si la unidad todavía no está balanceada se tendrá que repetir el proceso hasta que ambos picos sean iguales. Esto podría tomar un largo tiempo dependiendo del tamaño de la unidad, longevidad de la unidad.

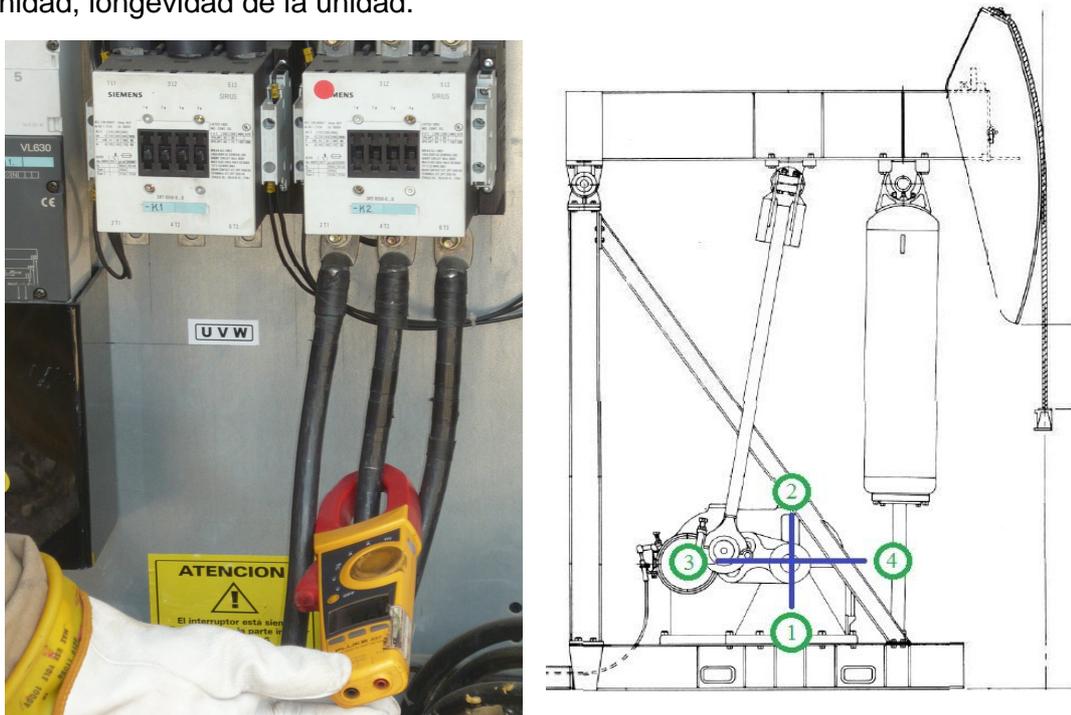


Figura 15. Medición de corriente y voltaje

## **4. DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO**

El presente proyecto de grado está orientado al aprovechamiento de variables eléctricas dadas en el bombeo mecánico con el objetivo de utilizarlas para la detección de fallas en el sistema. Igualmente buscar su aprovechamiento para la mejora de procesos tales como el balanceo de la unidad e incursionar en el ámbito de la investigación para determinar métodos alternativos a los convencionales para obtener el balanceo mismo de la unidad.

Actualmente el balanceo es un proceso que se lleva a cabo sin la debida coordinación de las dos partes directamente involucradas en el proceso, como lo son el departamento de producción y el de mantenimiento eléctrico de ECOPETROL. Razón por la cual el proyecto se enfocó a la metodología para optimizar el balanceo de las unidades balanceadas por aire.

### **4.1 VISITAS REALIZADAS Y DATOS MEDIDOS EN CAMPO**

#### **4.1.1 Instalación y adquisición de datos de potencia con el Well Analyzer para unidades balanceadas por aire**

Para llevar a cabo esta prueba lo primero que se hizo fue leer y aprender acerca del sensor de potencia del equipo Well Analyzer y el software TWM. Se leyó todo lo correspondiente al manejo del software, acerca de su instalación y uso, acerca de la instalación del sensor de potencia e igualmente acerca de la forma de adquirir el dato como tal.

Se tomaron todas las precauciones del caso y se llevó a cabo el debido procedimiento como se explica en los siguientes pasos que se tomaron en la prueba. La prueba se realizó en el pozo DT-38 perteneciente a campo DINA.

##### **4.1.1.1 Verificación de condiciones estables del pozo**

Inicialmente se verificó que el pozo estuviera operando normalmente. Se realizó la prueba de nivel de fluido y dinagrama para verificar que el pozo se encontrara en condiciones de estado estable (condición normal), y tomar el dato de presión del cilindro. Se obtuvieron los siguientes resultados:

##### **Prueba acústica de nivel de fluido**

Lo primero que realizaron los operadores de la empresa Weatherford fue instalar la pistola para realizar la correspondiente prueba, como se observa en la siguiente imagen.



Figura 16. Instalación pistola para prueba de nivel

Luego estando ya en el software TWM se realizó la debida configuración y adquisición de los datos de presión del casing y el nivel de fluido como tal. En las siguientes imágenes se puede observar los resultados.

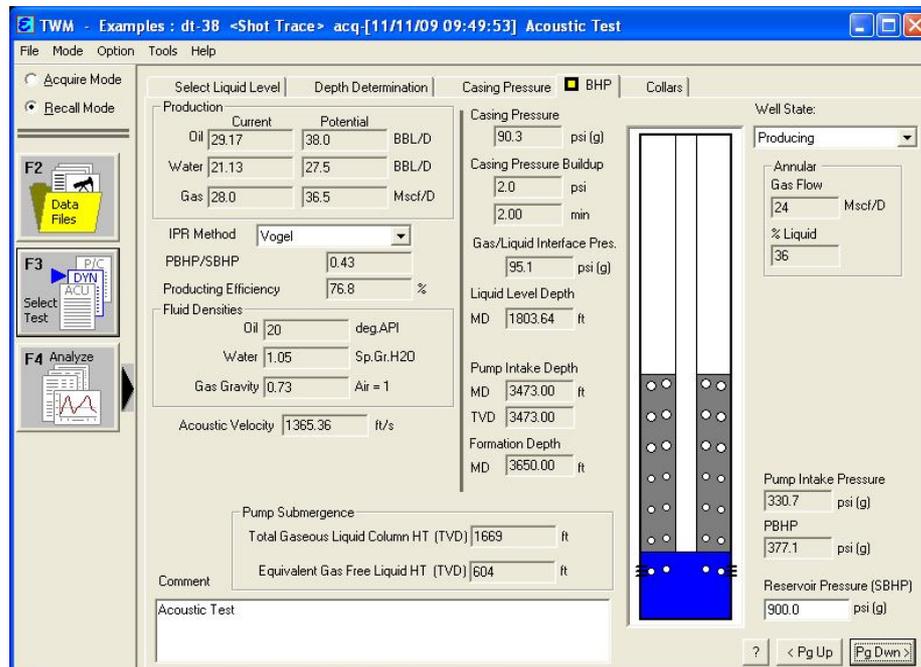


Figura 17. Prueba de nivel de fluido

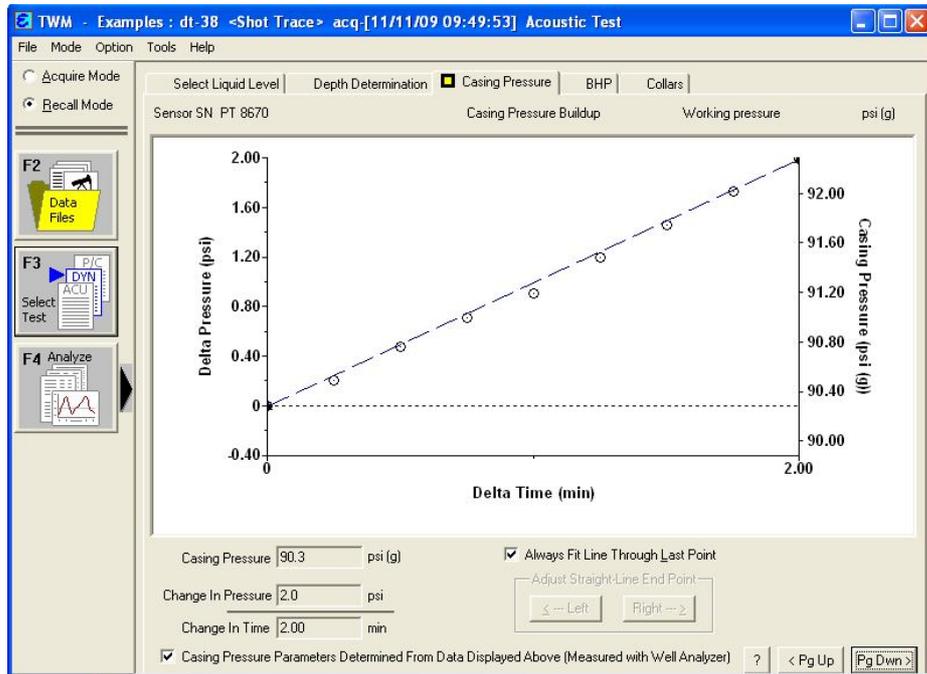


Figura 18. Presión del casing

### Carta Dinagráfica

Como se puede observar en la siguiente imagen lo primero que se hizo por parte de los operarios de Weatherford fue la instalación de la celda de carga y posteriormente en el software TWM se hizo la adquisición de los datos de carga y posición para obtener la carta dinagráfica.



Figura 19. Instalación celda de carga

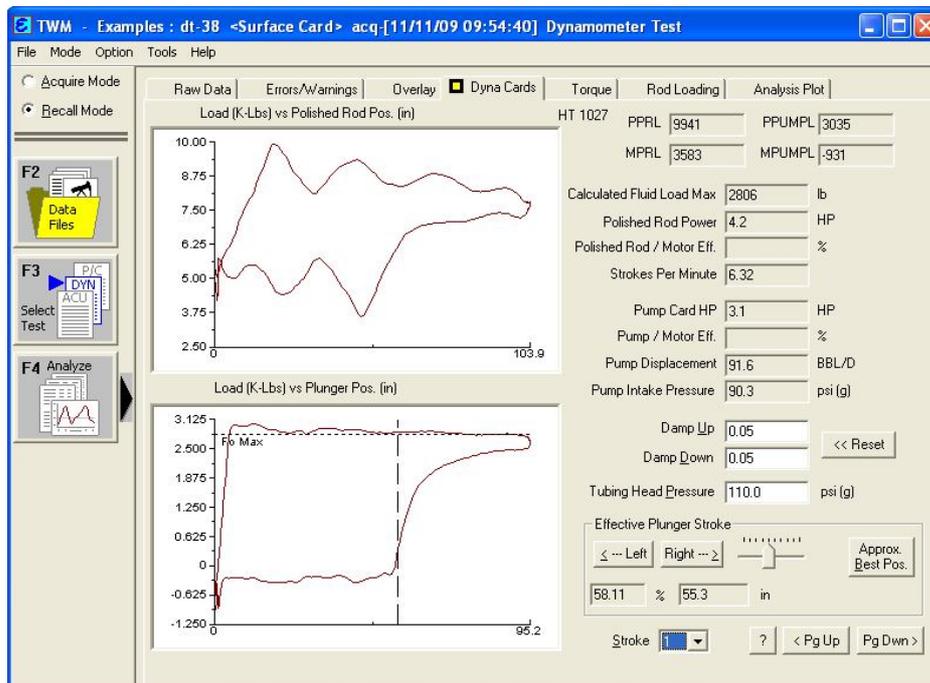


Figura 20. Carta dinográfica de superficie y de fondo para el pozo DT-38

#### 4.1.1.2 Instalación sensores de corriente

Para esto se realizó el siguiente procedimiento:

- Verificar que el sitio esté libre de humedad al igual que los sensores.
- Utilizar los guantes de aislamiento de seguridad y las medidas de seguridad que sean necesarias.
- Detener la unidad de bombeo.
- Desconectar el switch principal de potencia y abrir la caja de conexiones.
- Revisar visualmente que todos los cables, fusibles, relés y demás elementos estén en buenas condiciones, verificar que no haya sobrecalentamiento, aislamientos dañados u otra posible falla eléctrica.
- Instalar el sensor de **corriente izquierdo** alrededor de la **línea izquierda**, como se indica en la figura 21 y verificar su adecuada orientación (el lado con la etiqueta hacia arriba). El cable debe pasar perpendicular y centrado a la mandíbula del sensor para mayor exactitud.
- Instalar el sensor de **corriente derecho** alrededor de la **línea derecha**, como se indica en la figura 21 y verificar su adecuada orientación. El cable debe pasar perpendicular y centrado a la mandíbula del sensor para mayor exactitud.
- Verificar que las mandíbulas de los sensores estén totalmente cerradas y garantizar que el sensor no se moverá después de instalado.

#### 4.1.1.3 Instalación sensores de voltaje

Los 3 Sensores de Voltaje fueron conectados a las fases correspondientes. Cada sensor esta marcado con sus correspondientes posiciones: **IZQUIERDO, CENTRO Y DERECHA**. Se conecto cada sensor en la posición adecuada en las fases del motor.

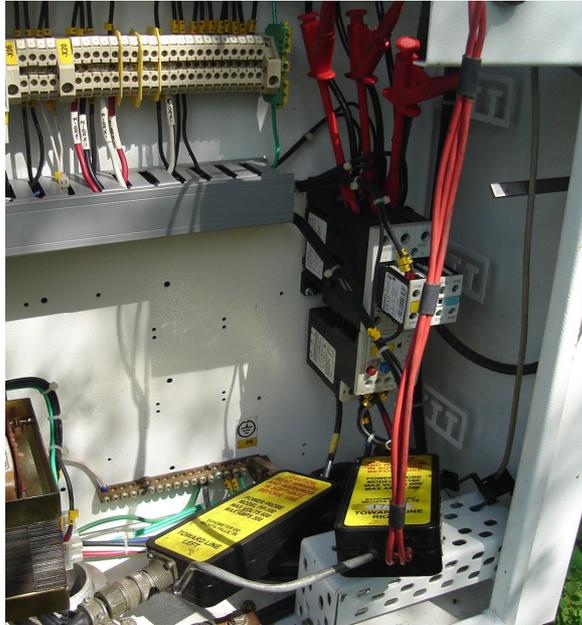


Figura 21. Instalación sensor de potencia

#### 4.1.1.4 Conexión de los sensores al portátil del Well Analyzer

Una vez instalados los sensores, se procedió a conectar la otra punta del sensor de potencia a un costado del portátil que pertenece al equipo WELL ANALYZER.

Una vez instalados los sensores y verificada su correcta instalación y posición se procedió a encender la Unidad de Bombeo nuevamente.

#### 4.1.1.5 Adquisición del dato de corriente

Para la adquisición del dato de corriente y potencia se realizo como se explica en el siguiente procedimiento.

##### Configuración del Software TWM

- Con el Software TWM abierto, y el sistema bombeando normalmente seleccionar en “Modo de Adquisición”
- Presionar en “Base Well File” (F3) y seleccionar el pozo dando click en “Open”, esto si los datos del pozo están en la base de datos, de lo contrario creamos uno nuevo en “New”.
- Presionar en “ Select Prueba “ (F4) y seleccione la opción en la pestaña “POWER/CURRENT”
- Presionar en “Adcquire Data” (F5)

- Leer las indicaciones y presionar “Next” cuando se tenga conocimiento de lo que allí se plantea, hasta que se muestre “Finalizar” y presionarlo.

### **Adquisición del Dato de Potencia**

- Ingresar datos específicos del pozo y del motor.
- Presionar en el botón “BEGIN”, al inicio de la carrera ascendente
- Presionar en el botón “END”, cuando se hayan cumplido dos ciclos de bombeo completos.
- Verificar que en las gráficas obtenidas los 2 ciclos sean similares tanto en amplitud como en forma en los datos de corriente y potencia vs. Time. Si no es así debe tomarse de nuevo los datos, pues ocurrió algún error.
- Guardar los datos obtenidos.

Finalmente y seguido todo el procedimiento mencionado anteriormente se obtuvo la siguiente gráfica de corriente y potencia del motor de la unidad de bombeo balanceada por aire del pozo DT-38.

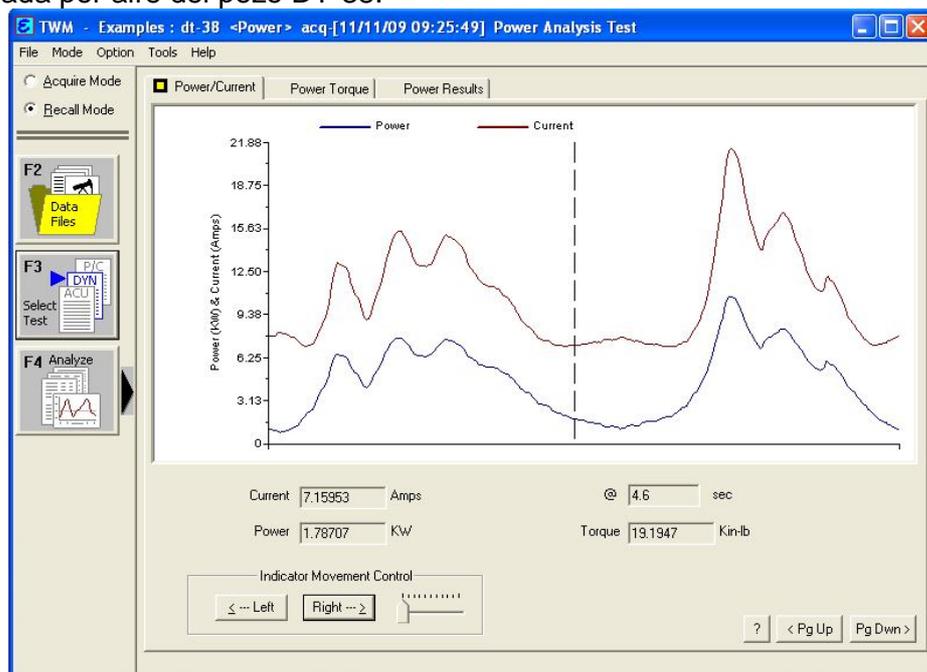


Figura 22. Gráfica de corriente y potencia del motor del pozo DT-38

### **4.1.2 Pruebas de presión**

Se realizaron pruebas de presión en varios pozos del campo PALOGRANDE de ECOPETROL, que consistían básicamente en observar el sensor de presión del cilindro que proporciona el contrabalance en las unidades de balanceo mecánico balanceadas por aire en diferentes posiciones de la manivela, es decir en diferentes posiciones de la cabeza de caballo del machín. Cabe destacar que la mayoría de los pozos cuentan con sensor digital puesto en superficie para su comodidad en la

lectura, pero existen pozos que cuentan únicamente con manómetro análogo que no arroja una información confiable y que además está pegado al cilindro, haciendo que la medida sea aún más difícil de tomar pues el manómetro sube y baja a medida que el cilindro lo hace.



Figura 23. Manómetro análogo y sensor de presión digital

Se tomaron cinco mediciones en cada uno de los pozos como lo indica la figura 24.

Se observó que el sensor encargado de mostrar el valor de la presión del cilindro es un poco lento y proporciona las medidas un poco retrasadas, es decir por ejemplo como sabemos la máxima presión se obtiene cuando la cabeza de cabello esta en la parte baja y se observó que este valor lo suministra un poco después de que se esté realmente ahí; por tal motivo no es tan sencillo tomar medidas precisas de esta forma.

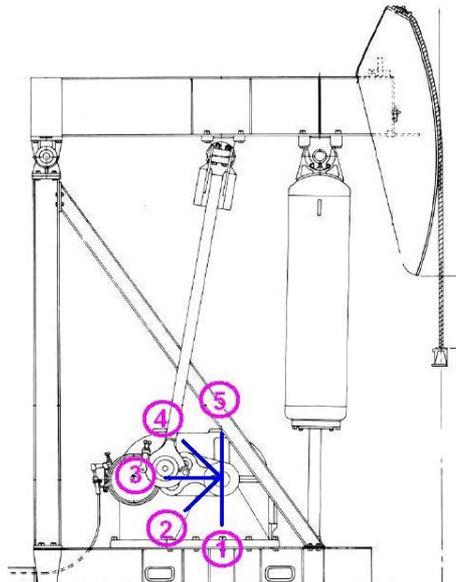


Figura 24. Posiciones para medir presión

.Los datos medidos en diferentes pozos, son mostrados en la tabla 1.

Con los datos obtenidos, se procedió a generar una función matemática que describiera este comportamiento, es decir a encontrar una curva tal que pasará por los puntos obtenidos ajustándose de la mejor manera. Posteriormente se llegó a una aproximación general del comportamiento de la presión del cilindro aprovechando los datos medidos en diferentes pozos. Esto se realizó con el fin de poder obtener la función de presión de cualquier de estos pozos con tan sólo tener el valor máximo y mínimo de la presión existente en el cilindro; todo esto para realizar análisis de la presión que debe haber en el cilindro para que la unidad se encuentre balanceada. Para generalizar la función se llevaron a cabo varias pruebas, graficando inicialmente los datos experimentales obtenidos en pozo, y luego teniendo los valores máximos y mínimos de cada pozo se probó generando los demás puntos de diferentes formas y se concluyó lo siguiente:

<b>NOMBRE POZO</b>	<b>TIPO DE UNIDAD</b>	<b>SENSOR DE PRESIÓN</b>	<b>PRESIÓN MÁXIMA</b>	<b>PRESIÓN MÍNIMA</b>	<b>RANGO</b>	<b>MEDIDA 1</b>	<b>MEDIDA 2</b>	<b>MEDIDA 3</b>	<b>MEDIDA 4</b>	<b>MEDIDA 5</b>
PALO-GRANDE 25	<b>A-640D-427-144</b>	NO	<b>267</b>	<b>212</b>	<b>55</b>	267	250	230	222	212
PALO-GRANDE 0012	<b>A-1280D-427-192</b>	SÍ	<b>303</b>	<b>233</b>	<b>70</b>	300	271	245	238	233
PALO-GRANDE 0030	<b>A-1280D-427-192</b>	SÍ	<b>272</b>	<b>224</b>	<b>48</b>	272	255	238	233	224
PALO-GRANDE 0008	<b>A-1280D-427-192</b>	SÍ	<b>248</b>	<b>217</b>	<b>31</b>	248	236	230	222	217
PALO-GRANDE 0024	<b>A-2560D-470-240</b>	SÍ	<b>381</b>	<b>310</b>	<b>71</b>	381	354	335	317	310

Tabla 1. Datos de presión medidos

- La medición 1 y 5 se mantienen iguales.
- La medición 2 es aproximadamente igual a la presión máxima restada con 20psi, siempre y cuando la diferencia entre la presión máxima y la presión mínima (rango) sea mayor a 50, ubicando este punto en un tiempo considerado como el 20% del semiciclo. De lo contrario, si el rango es menor que 50, la medición 2 será tomada como la presión mínima restada con 10psi.
- La medición 3 se pudo aproximar tomando este valor como el promedio entre la presión máxima y la presión mínima, ubicando este punto en un tiempo del 34% del tiempo del semiciclo.
- La medición 4 es aproximadamente igual a la presión mínima sumada con 10psi, siempre y cuando la diferencia entre la presión máxima y la presión mínima (rango) sea mayor a 50, ubicando este punto en un tiempo considerado como el 64% del semiciclo. De lo contrario, si el rango es menor que 50, la medición 4 será tomada como la presión mínima sumada con 5 psi.

Como ya se dijo, con esta aproximación es necesario tan sólo tener los puntos de presión máxima y mínima para generar la función de presión de cualquier pozo, aprovechando los datos de pozo medidos. Los resultados de estas aproximaciones se muestran en la figura 25 y 26 para cada pozo, comprobando que fueron muy buenos:

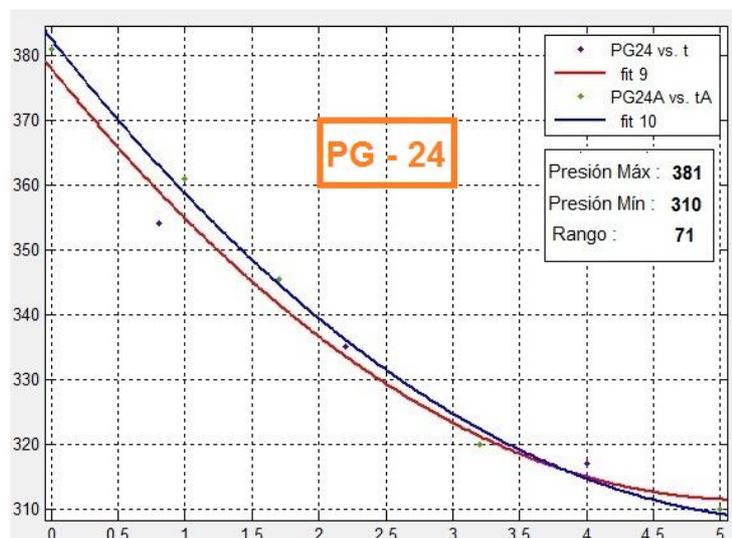


Figura 25. Aproximación para el pozo PG-24

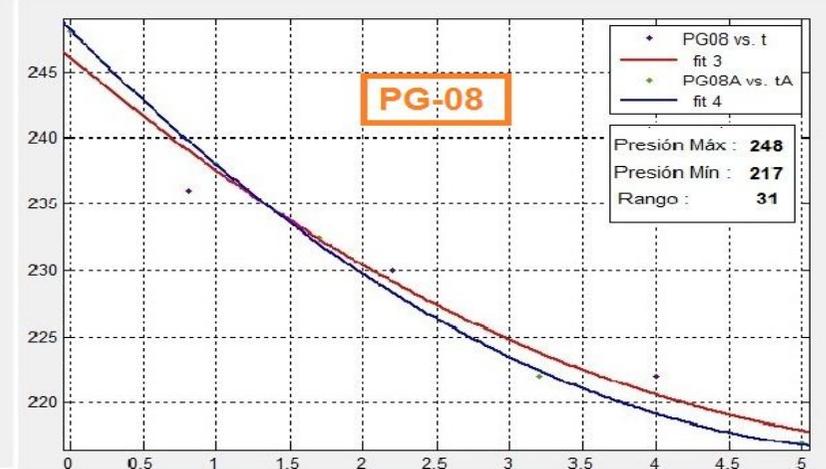
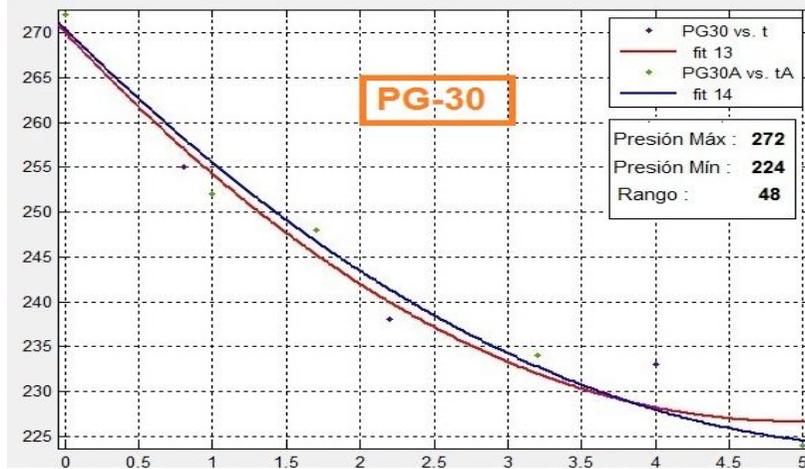
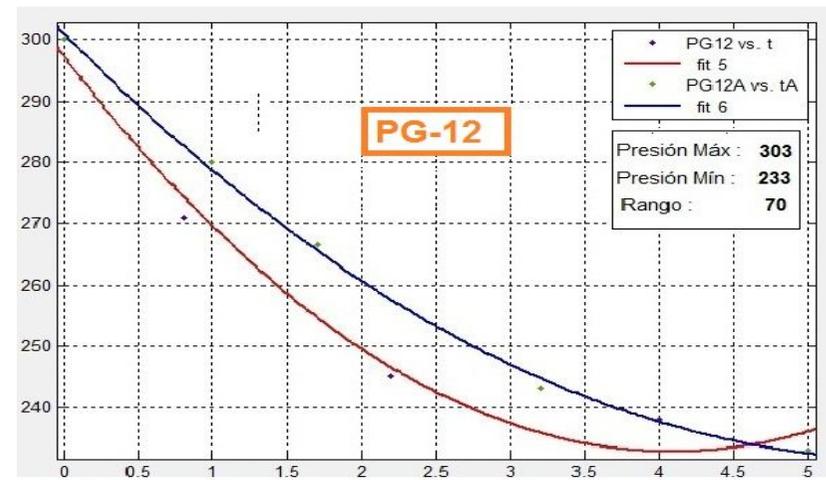
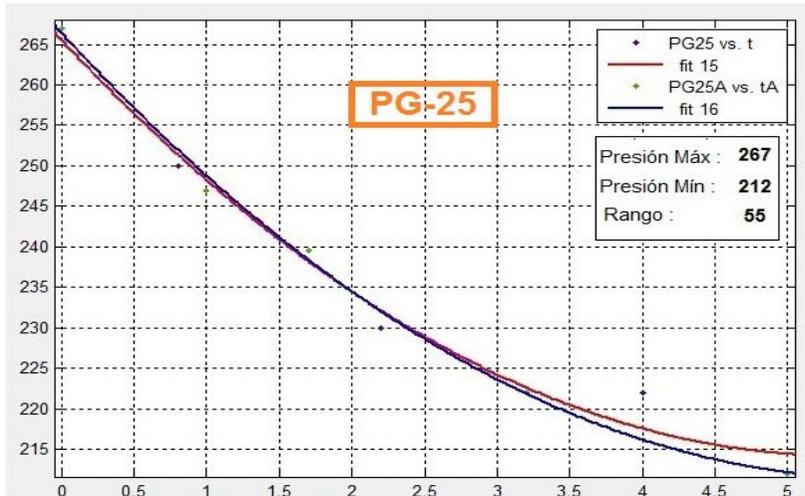


Figura 26. Aproximaciones para los pozos PG-25, PG-12, PG-30, PG-08.

## 4.2 MÉTODOS PARA EL ÓPTIMO BALANCEO

### 4.2.1 Método 1. Balanceo amperimétrico

En este método se realizan los siguientes pasos para hallar el valor de la presión que tiene que existir en cilindro para que la unidad se encuentre balanceada.

1. Teniendo en cuenta que la primera mitad del ciclo de bombeo es la subida (UP) y la segunda mitad es la correspondiente a la bajada (DOWN) del machín en el bombeo mecánico, se toma la gráfica de corriente que se obtiene con las pinzas de corriente del equipo Well Analyzer.

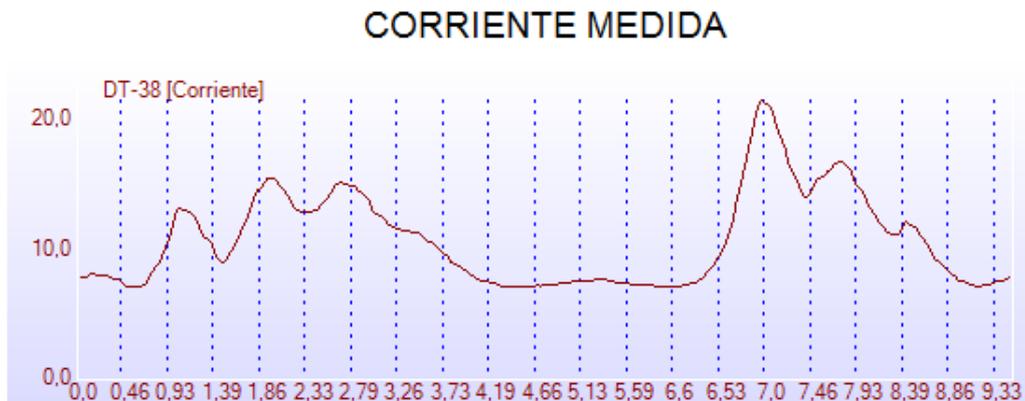


Figura 27. Corriente medida

2. Se localiza el instante de tiempo en el cual se da el valor máximo de corriente en todo el ciclo y con este dato ubicamos la presión correspondiente en dicho instante en la gráfica de presión, como se muestra a continuación:

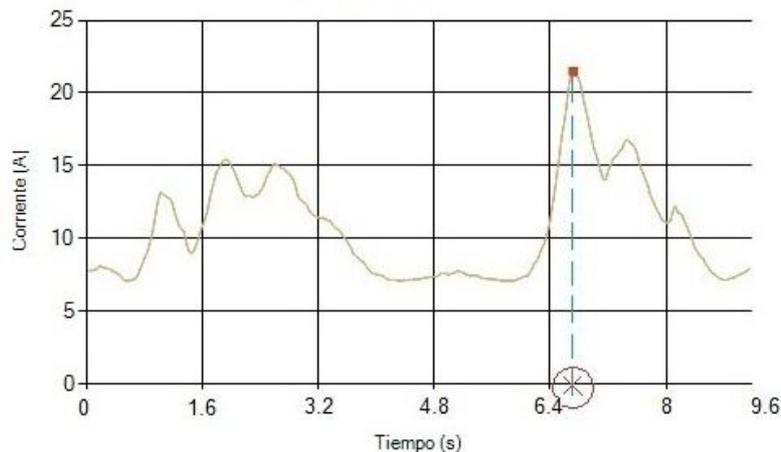


Figura 28. Ubicación del instante del pico corriente

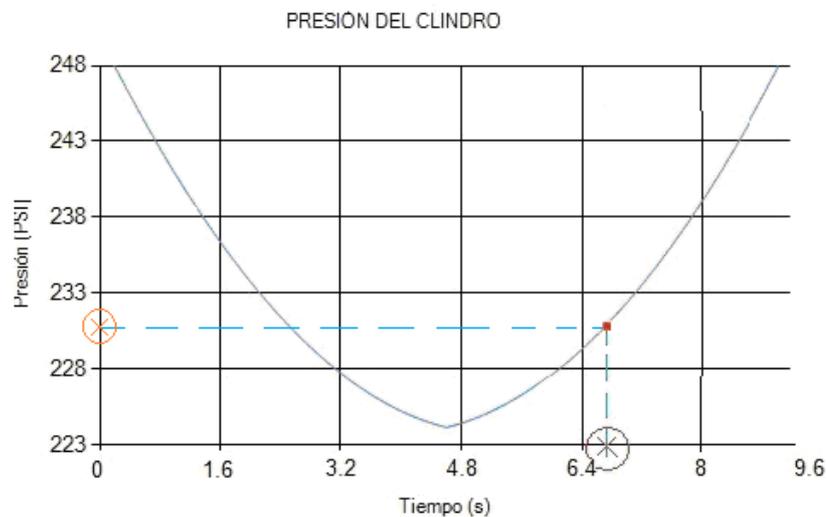


Figura 29. Ejemplo obtención de presión

3. Como ya se tiene la diferencia que existe entre los dos picos de corriente dados en cada semiciclo (Paso 3. Corriente-Potencia, en la pestaña gráfica) que para este caso en particular es 6Amp aproximadamente, ya que en el semiciclo de subida se obtuvo un pico aproximado de 15Amp y en el de bajada un pico aproximado de 21 Amp, entonces se aprecia que para que la unidad este balanceada se necesitaría aumentar en un valor de 3 Amp en la subida y en la bajada disminuir 3 Amp obteniendo así dos picos de corriente iguales ubicados en 18 Amp que se traduce en una unidad adecuadamente balanceada, por tanto lo que se hace es desplazarse por la gráfica de corriente buscando el instante donde se tengan los 18 Amp para así saber que presión se debe tener en el cilindro en donde se cumple dicha corriente, como se muestra a continuación:

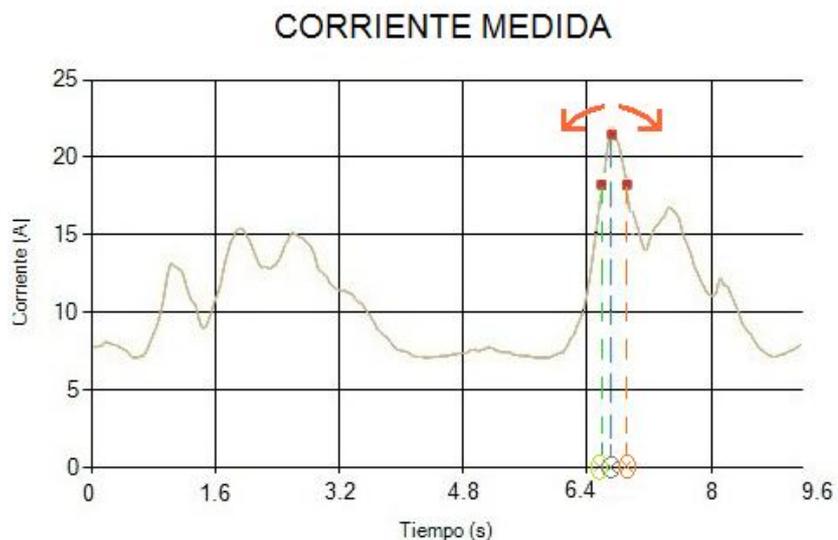


Figura 30. Análisis de corriente para balancear

Se nota claramente que existen dos puntos en los cuales se tienen 18 Amp. que es el valor que necesitamos analizar para encontrar la presión correspondiente en dicho instante para alcanzar un balanceo, para lo cual analizamos ambos instantes de tiempo.

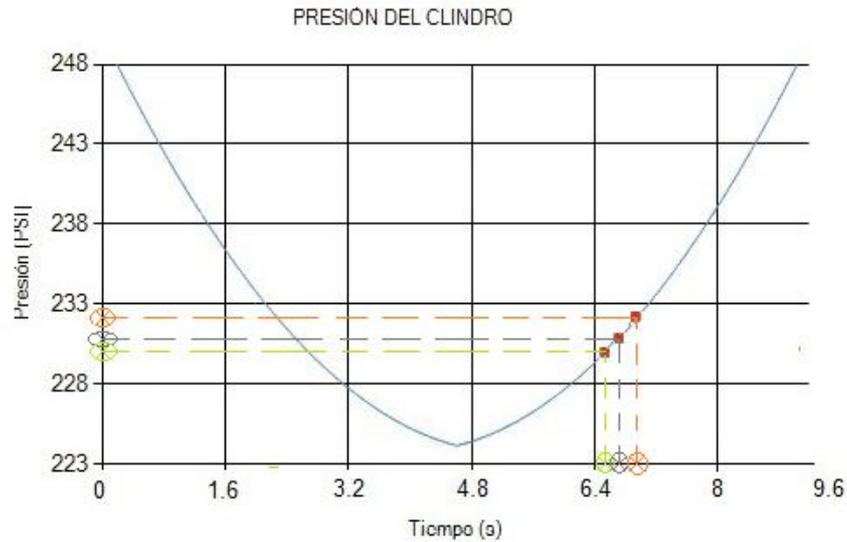


Figura 31. Análisis de presiones para balancear

Las presiones obtenidas son aproximadamente 231 Psi y 229 Psi. Es aquí donde se hace importante hacer un análisis lógico de lo que pasa si se adiciona o extrae aire al cilindro que realiza el contrabalanceo. Al agregar aire al cilindro lo que se logra es que el sistema tenga más fuerza y ayuda por parte del cilindro haciendo que la unidad motriz no se esfuerce tanto en realizar el semiciclo de subida, pero que afecta también el semiciclo de bajada provocando que se esfuerce más la unidad motriz en esta parte del ciclo ya que se tiene más aire por comprimir. Por otra parte si se extrae aire lo que se consigue es que se tenga un poco más de esfuerzo en la subida pero se ve compensando en la bajada que resulta más fácil, porque tiene menos aire por comprimir.

Dado el anterior análisis se concluye que cuando se tenga un pico de corriente más bajo en el semiciclo de subida que el de bajada, es necesario **extraer** aire del cilindro, para que se pueda llegar a una igualdad de picos de corriente que significa una unidad balanceada. De igual forma cuando se tenga un pico de corriente más alto en el semiciclo de subida que el de bajada, es necesario **suministrar** aire del cilindro, para que se pueda llegar a una igualdad de picos de corriente que significa una unidad balanceada

4. Ya se concluyó que es necesario extraerle aire al cilindro, se procede entonces a ubicar el instante de tiempo donde ocurre el pico de corriente de 18Amp que es el adecuado para balancear la unidad. Se observa la presión para dicho instante y para este caso específico es 229 Psi, de lo contrario se obtiene el efecto no deseado; pues se colocaría una presión mayor a la actual y se desbalancearía mucho más la unidad. Esta presión es la que debe existir cuando la manivela se encuentra en posición horizontal, es decir en aproximadamente la mitad del recorrido como se muestra a continuación:

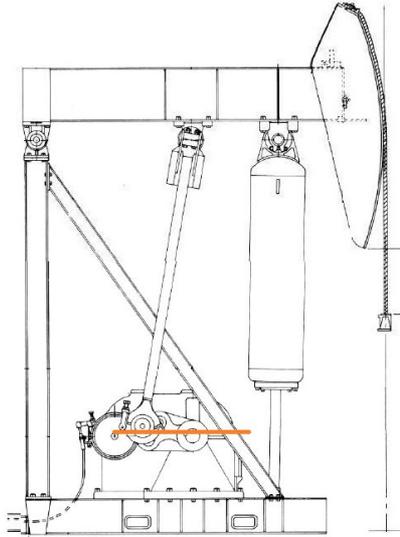


Figura 32. Posición a la que se debe colocar la presión para balancear

Es aquí donde se presenta un problema pues como se puede observar claramente el cilindro se ha desplazado y se encuentra en la parte de arriba, entonces cuando el operario quiera extraer o suministrar aire en esta posición tendría que tener alguna herramienta para realizar dicha tarea y en la práctica esto no se hace así. Cuando el operario es enviado a cambiar la presión del cilindro lo que hace es detener la unidad en la parte baja, es decir cuando la cabeza de caballo está en la parte de abajo y el cilindro también está en la parte más baja y procede a cambiar el valor máximo de dicho cilindro.

Entonces es necesario generar una función tal que el punto que encontramos de 229 psi se ajuste en la parte media de dicha función, es decir que la función que se encuentre tenga una presión de 229 psi en la parte en que la manivela está en la posición horizontal para así poder decirle al operario con certeza cuanta debe ser la presión máxima en la posición en que él extrae o suministra aire para que se cumpla la condición dada. Por lo cual utilizamos la aproximación que se obtuvo gracias a los datos prácticos medidos en varios pozos de ECOPETROL (Ver visitas realizadas y datos medidos en campo en el capítulo 4).

Con la gráfica obtenida, que es en realidad la misma gráfica de presión con la que se contaba pero con la gran diferencia que ha sido desplazada para hacer coincidir el punto preciso que necesitamos de presión (la función de la presión depende de la compresibilidad del aire y no puede cambiar de forma drástica), como se percibe en la siguiente gráfica, se dice entonces que para que haya un valor de presión de 229 psi cuando la manivela esta en posición horizontal se debe tener una función tal que su máxima presión sea 239 psi.

Por cuestiones prácticas dar un valor exacto y constante en este tipo de sistemas es algo difícil, además un cambio tan pequeño de presión muchas veces es depreciado generalmente cuando es menor de 20psi; por tanto es mejor dar un rango de presión donde se tenga en cuenta el valor obtenido después del análisis. Por ejemplo para este caso el valor máximo que debe existir en el cilindro es de 229 psi a 239 psi dando un rango de 10 psi.

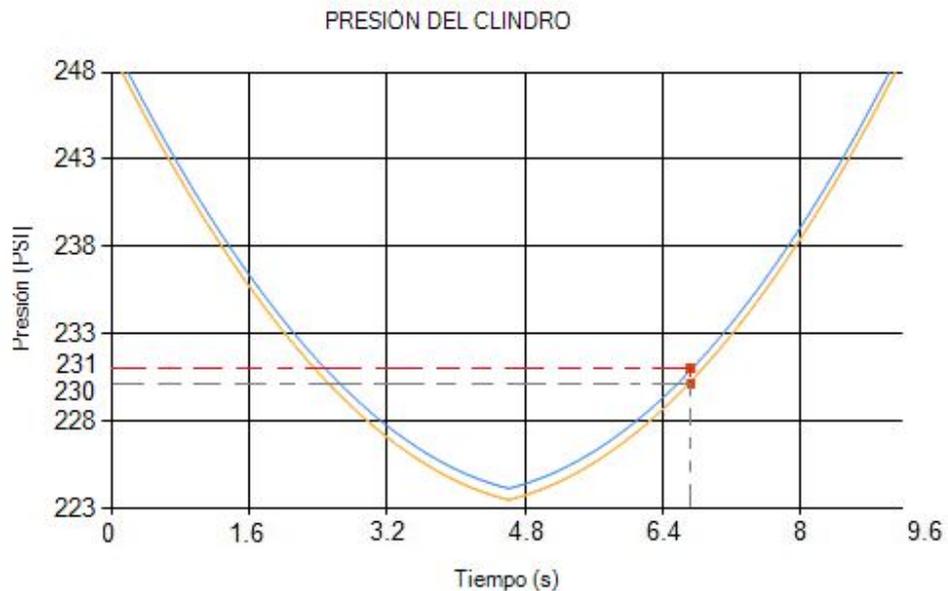


Figura 33. Resultado del valor para balancear la unidad

Como se puede observar para corrientes donde se presentan cambios tan abruptos en tiempos tan cortos el método no es muy efectivo pues los puntos de importancia de los análisis quedan muy cercanos. Por tal motivo es necesario crear un segundo método con el mismo análisis pero teniéndose una gráfica de corriente filtrada (sin cambios abruptos) ó aproximada, donde la propiedad fundamental de cada semiciclo que es el **pico máximo** no sea alterada.

#### 4.2.2 Método 2. Balanceo amperimétrico por ajuste de curvas

En este método se realizan los siguientes pasos para hallar el valor de la presión que tiene que existir en cilindro para que la unidad se encuentre balanceada:

1. Como se vio en la sección de explicación del software, en el paso 2 *Sensores*, en la pestaña *Adquisición Datos de Presión* se solicita al operario suministrar dos valores de presión del cilindro, una presión máxima que se da al inicio de la carrera ascendente y una presión mínima que se da en el inicio de la carrera descendente; con estos dos datos y teniendo en cuenta los análisis de las pruebas realizadas en el capítulo 4, se realiza un ajuste de curvas para encontrar la función en el tiempo que describe la presión del cilindro a lo largo de toda la trayectoria de desplazamiento de la cabeza de caballo. Encontrando una gráfica como la siguiente:

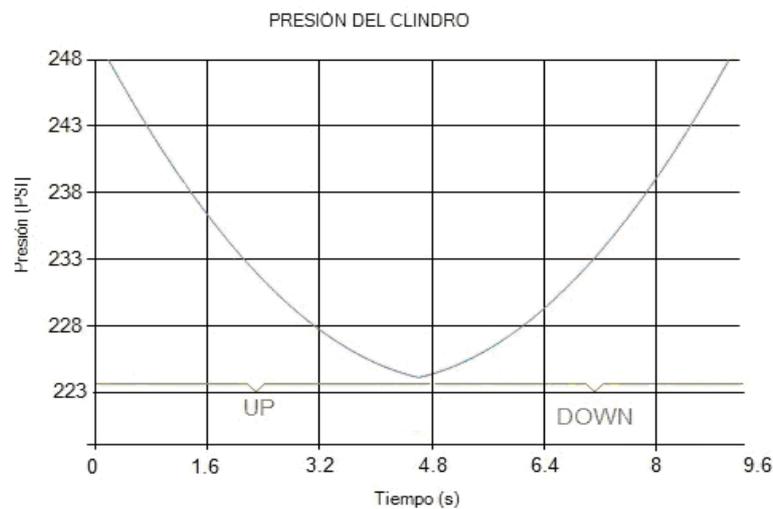


Figura 34. Curva de Presión vs. Tiempo

2. Tomando los datos de corriente obtenidos se capturan tres puntos para cada medio ciclo, el primero de ellos en el momento que inicia cada medio ciclo, el segundo de ellos es el pico ó valor máximo dado y por último el valor en el fin de cada semiciclo, como se muestra claramente a continuación:

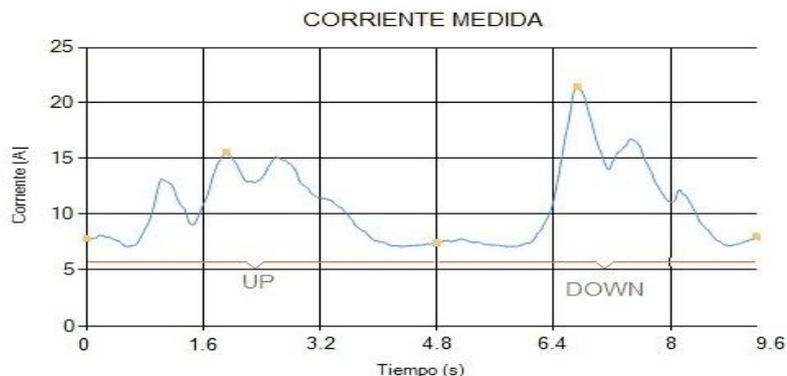


Figura 35. Puntos seleccionados para la aproximación polinómica

3. Se procede entonces con los puntos encontrados a generar una función polinómica que pase por dichos puntos para cada semiciclo, utilizando inicialmente la herramienta *cftool* (Curve Fitting Toolbox) de Matlab que permitió encontrar y ajustar una curva en este caso polinómica de orden 2 que cumplía tales condiciones. Posteriormente se implementó una librería que contiene la aplicación de ajuste de curvas llamada **Extrememathematics** para Visual que logró suprimir el trabajo que hacía el MATLAB para dicho ajuste y mejora la eficiencia del programa en la facilidad de manejo para los operarios. Obteniendo la siguiente gráfica:

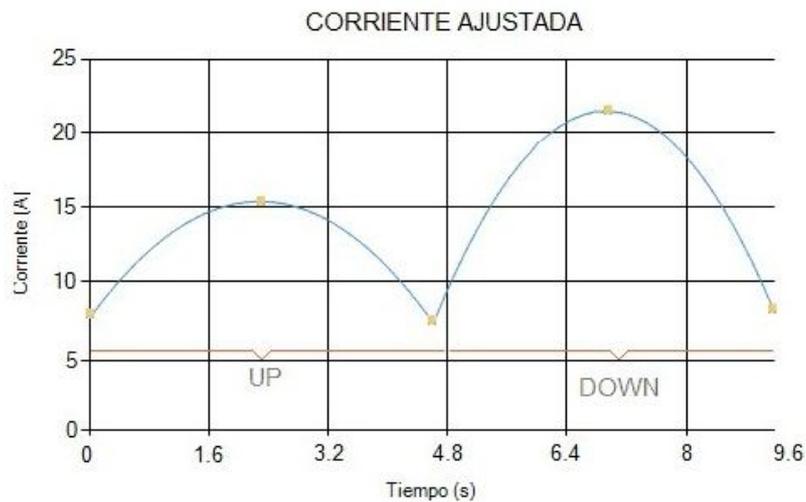
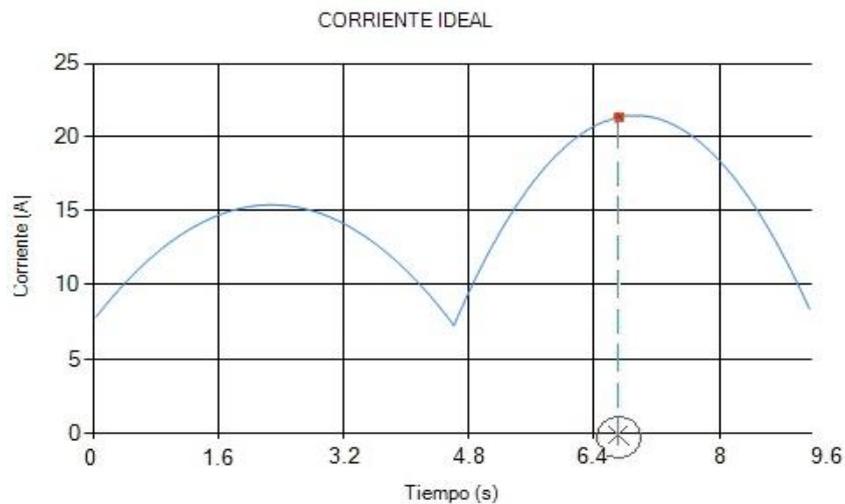


Figura 36. Gráfica Corriente Ajustada mediante una función polinómica

4. Para seguir con el análisis, se localiza el instante de tiempo en el cual se da el valor máximo de corriente en todo el ciclo y con este dato se ubica la presión correspondiente en dicho instante en la gráfica de presión, como se muestra a continuación:



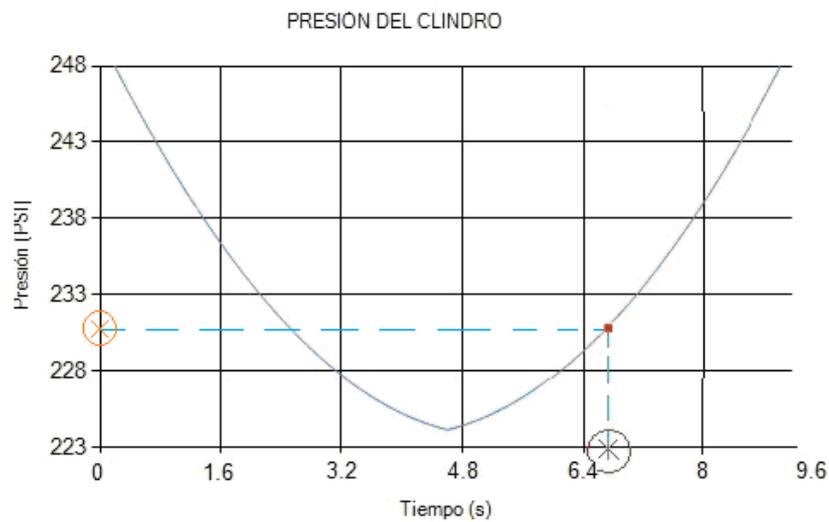


Figura 37. Ejemplo obtención de presión a partir de corriente

5. Como se dijo en el método anterior, ya se tiene la diferencia que existe entre los dos picos de corriente dados en cada semiciclo que para este caso en particular es 6Amp aproximadamente, entonces se aprecia que para que la unidad este balanceada se necesitaría aumentar en un valor de 3 Amp en la subida y en la bajada disminuir 3 Amp obteniendo así dos picos de corriente iguales ubicados en 18 Amp que se traduce en una unidad adecuadamente balanceada, por tanto lo que se hace es desplazarse por la gráfica de corriente buscando el instante donde se tengan los 18 Amp para así saber que presión se debe tener en el cilindro en donde se cumple dicha corriente, como se muestra a continuación:

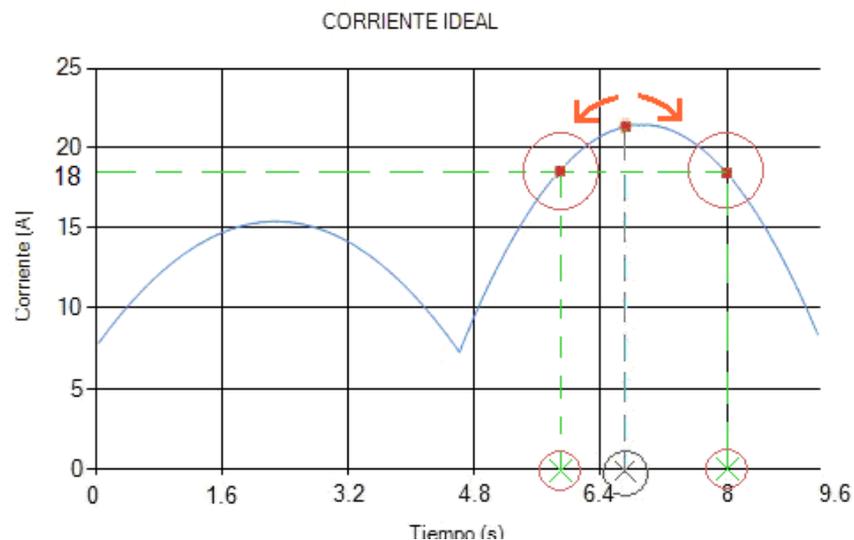


Figura 38. Búsqueda del punto de corriente para balancear

Se nota claramente que existen dos puntos en los cuales se tienen 18 Amp que es valor que necesitamos analizar para encontrar la presión correspondiente en dicho instante para alcanzar un balanceo, para lo cual analizamos ambos instantes de tiempo.

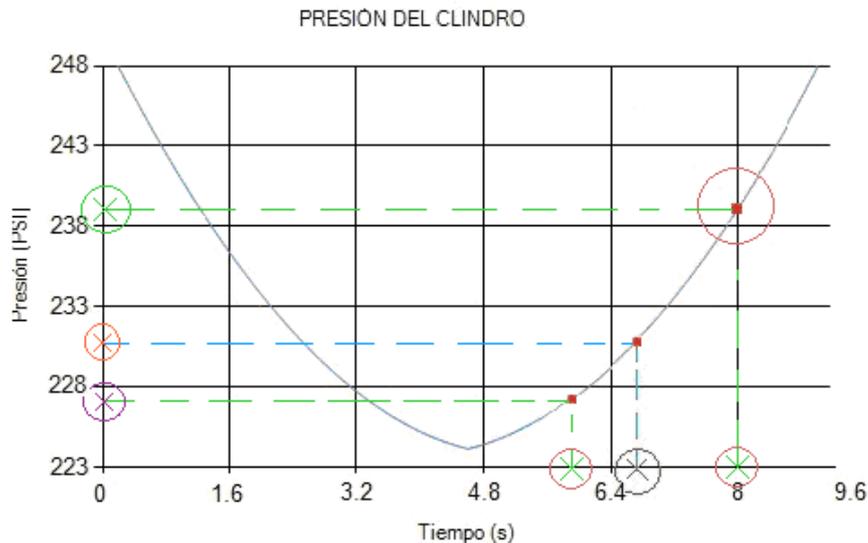


Figura 39. Análisis de presiones para balancear

Las presiones obtenidas son aproximadamente 240Psi y 226Psi. Al igual que en el método anterior se dice que cuando se tenga un pico de corriente más bajo en el semiciclo de subida que el de bajada, es necesario **extraer** aire del cilindro, para que se pueda llegar a una igualdad de picos de corriente que significa una unidad balanceada. De igual forma cuando se tenga un pico de corriente más alto en el semiciclo de subida que el de bajada, es necesario **suministrar** aire del cilindro, para que se pueda llegar a una igualdad de picos de corriente que significa una unidad balanceada

6. Ya se concluyó que es necesario extraerle aire al cilindro, se procede entonces a ubicar el instante de tiempo donde ocurre el pico de corriente de 18Amp que es el adecuado para balancear la unidad. Se observa la presión para dicho instante y para este caso específico es 226Psi, de lo contrario se obtiene el efecto no deseado; pues se colocaría una presión mayor a la actual y se desbalancearía mucho más la unidad. Esta presión es la que debe existir cuando la manivela se encuentra en posición horizontal, es decir en aproximadamente la mitad del recorrido al igual que se muestra en la figura 32.

Es aquí donde se presenta un problema pues como se puede observar claramente el cilindro se ha desplazado y se encuentra en la parte de arriba, entonces cuando el operario quiera extraer o suministrar aire en esta posición tendría que tener alguna herramienta para realizar dicha tarea y en la practica esto no se hace así. Cuando el operario es enviado a cambiar la presión del cilindro lo que hace es detener la unidad en la parte baja, es decir cuando la cabeza de caballo está en la parte de abajo y el

cilindro también esta en la parte más baja y procede a cambiar el valor máximo de dicho cilindro.

Entonces es necesario generar una función tal que el punto que encontramos de 226psi se ajuste en la parte media de dicha función, es decir que la función que se encuentre tenga una presión de 226psi en la parte en que la manivela esta en la posición horizontal para así poder decirle al operario con certeza cuanta debe ser la presión máxima en la posición en que él extrae o suministra aire para que se cumpla la condición dada. Por lo cual utilizamos la aproximación que se obtuvo gracias a los datos prácticos medidos en varios pozos de ECOPETROL (Ver visitas realizadas y datos medidos en campo en el capítulo 4)

Con la gráfica obtenida, que es en realidad la misma gráfica de presión con la que se contaba pero con la gran diferencia que ha sido desplazada para hacer coincidir el punto preciso que necesitamos de presión (la función de la presión depende de la compresibilidad del aire y no puede cambiar de forma drástica), como se percibe en la siguiente gráfica, se dice entonces que para que haya un valor de presión de 226psi cuando la manivela esta en posición horizontal se debe tener una función tal que su máxima presión sea 236psi.

Por cuestiones prácticas dar un valor exacto y constante en este tipo de sistemas es algo difícil, además un cambio tan pequeño de presión muchas veces es depreciado generalmente cuando es menor de 20psi; por tanto es mejor dar un rango de presión donde se tenga en cuenta el valor obtenido después del análisis. Por ejemplo para este caso el valor máximo que debe existir en el cilindro es de 226psi a 236psi dando un rango de 10psi.

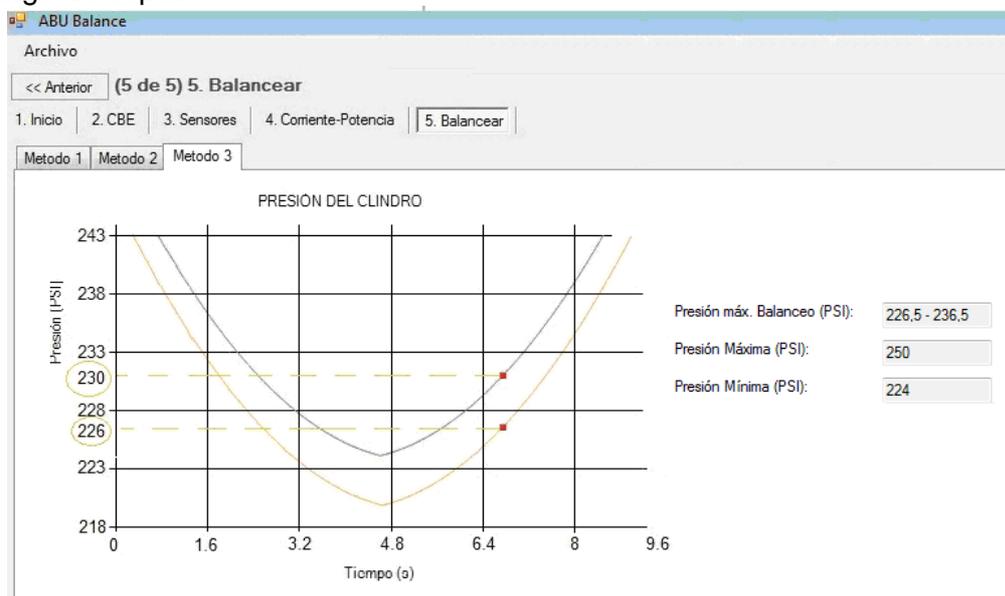


Figura 40. Resultado del valor para balancear la unidad

### 4.2.3 Método 3. Balanceo por medio del CBE

Para llevar a cabo el balanceo de una forma alternativa se ideó un tercer método, mediante la utilización del CBE y las tablas de datos del fabricante Lufkin para las unidades de bombeo mecánico balanceadas por aire, donde para cada valor de CBE se muestra cual debería ser la presión que debería existir en el cilindro.

Inicialmente se introdujeron al programa los datos de presión y CBE que en la siguiente figura se especifican. Con la librería **Extrememathematics** utilizada en el software desarrollado se logró calcular una relación entre la presión y el CBE.



**Counterbalance Data** (effective counterbalance in pounds based on average pressure.)

Unit Size	Average Pressure, PSIG												
	150	175	200	225	250	275	300	325	350	375	400	410	
A-25600-470-240													
A-18240-470-240	-	2,870	5,740	8,610	11,480	14,350	17,220	20,090	22,960	25,830	28,700	29,850	
A-12800-470-240													
A-9120-470-240													
A-18240-427-216													
A-12800-427-216	920	3,220	5,520	7,820	10,120	12,420	14,720	17,020	19,320	21,620	23,920	24,830	
A-9120-427-216													
A-18240-427-192													
A-12800-427-192	3,905	6,475	9,045	11,615	14,185	16,755	19,325	21,895	24,465	27,035	29,605	30,635	
A-9120-427-192													
A-4560-256-120	4,035	5,415	6,795	8,175	9,560	10,940	12,320	13,700	15,085	16,465	17,845	18,400	
A-3200-256-120													
A-3200-305-100	4,855	6,495	8,135	9,775	11,415	13,055	14,695	16,335	17,975	19,615	21,255	21,910	
A-2280-173-100	2,925	4,060	5,195	6,335	7,470	8,610	9,745	10,885	12,020	13,160	14,295	14,750	

\*Pressure shown is average pressure between maximum and minimum and occurs at approximately beam horizontal position. For counterbalance at other pressures use direct interpolation.

Figura 41. Especificaciones técnicas de presión para unidades Lufkin

Entonces lo que se realizó fue tomar la información de cada grupo de unidades y mediante la librería mencionada anteriormente, hallar una función lineal para la respectiva presión y el CBE. Los datos para los cuales no se especifica determinada presión se obtiene por interpolación directa. La función obtenida para cada grupo de unidades es de la siguiente forma:

$$\text{PRESIÓN} = A \cdot \text{CBE} + B$$

Donde A y B son constantes que la librería **Extrememathematics** ha calculado para satisfacer la relación entre la presión y el CBE para cada unidad.

Una vez obtenidas las diferentes funciones lineales que describen la relación entre la presión y el CBE para cada unidad de bombeo y mediante el CBE medido que el usuario a introducido en el software desarrollado, este calcula con dichas funciones la adecuada presión que debe tener el cilindro para el CBE que tiene la unidad de bombeo en el momento y de esta manera balancear la unidad de una manera alterna y que no se realiza en ECOPETROL.

### 4.2.4 Método 4. Balanceo por delta de corriente experimental

Finalmente y para tener una relación experimental más directa y posiblemente más fiable entre la presión en el cilindro para el balanceo y la corriente del motor, se optó

por llevar a cabo un ultimo método para hallar dicha relación y lograr un buen balanceo.

Inicialmente se le muestra al usuario la gráfica actual de corriente y los respectivos datos de interés, tales como picos de corrientes, la diferencia entre picos tanto en amperios como en porcentaje y también se muestra la presión máxima y mínima que tiene el cilindro. A continuación se muestra la imagen de cómo sería lo descrito anteriormente.

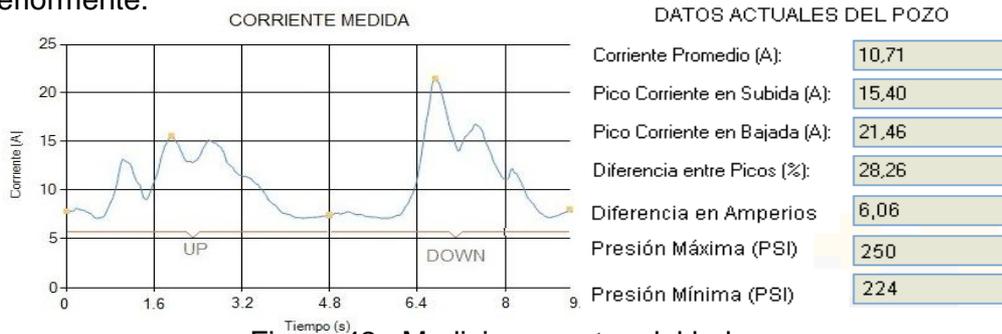


Figura 42. Mediciones antes del balanceo

Posteriormente se le sugiere al usuario un rango de presione a la cual la unidad eventualmente se balancearía. Se le sugiere la presión máxima del cilindro. Y también se le pide al usuario que ingrese al programa el valor de la presión máxima y mínima que finalmente le suministro al cilindro.

Una vez realizado el respectivo cambio de presión en el cilindro se le indica al usuario que repita el paso 4 del software desarrollado, en cual se debe cargar nuevamente el archivo .PWR proveniente del TWM.

En este punto el software desarrollado tiene la suficiente información para determinar el delta de corriente que se produjo debido al delta de presión que realizó. Con lo cual el software desarrollado estaría en capacidad de determinar la adecuada presión para el valor en amperios de los picos de corriente deseados y lograr de esta manera balancear la unidad de bombeo.

Como se observa en la siguiente gráfica, se producirá una nueva gráfica de corriente además los nuevos datos del pozo balanceado.

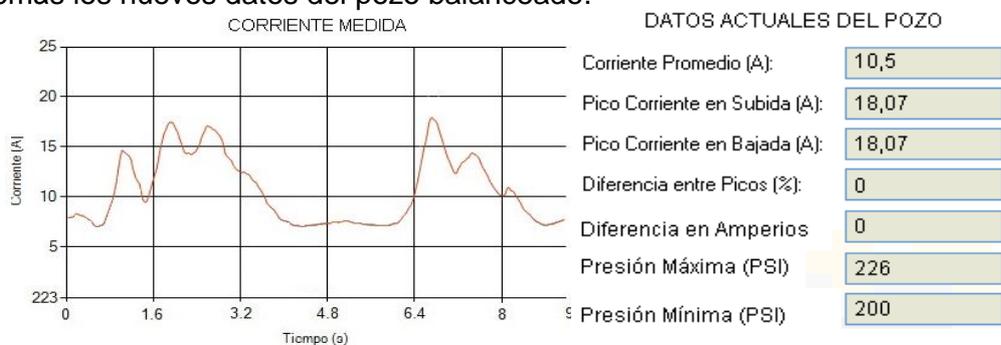


Figura 43. Mediciones después del balanceo

## 5. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Se realizaron variadas pruebas para el diseño del software desarrollado. Inicialmente se plantearon diferentes tipos de modelos para relacionar la corriente de la unidad motriz con la carga sobre la barra lisa. Igualmente también se analizaron y comprobaron los métodos para el balanceo. Sin embargo con el transcurso del tiempo se fueron encontrando ciertas limitaciones y cosas que no se esperaban. Razón por la cual a continuación se plasma las modificaciones que se le han hecho al proyecto desde su etapa inicial hasta la final.

### 5.1 ANÁLISIS DE LOS MÉTODOS ENCONTRADOS PARA EL BALANCEO

#### 5.1.1 Método 1. Balanceo amperimétrico

Como se describió en el capítulo de descripción del proyecto, para este primer método se utilizó la gráfica real de corriente del motor para hallar la nueva gráfica de presión requerida para el balanceo de la unidad.

Una vez hechos los respectivos cálculos y análisis para este método se observó que el cambio de presión desde el pico de corriente mayor (21 Amp.) al pico deseado (18 Amp.) era muy poco, significando en la práctica algo no muy apropiado porque no se justifica variar la presión del cilindro en tan pocos PSI. Dicha variación de presión en muy pocos PSI entre el pico actual de corriente y el deseado, es producto del cambio brusco que presenta la corriente en un lapso de tiempo muy corto, ya que cambia 6 Amp. en menos de un segundo. Debido a esto, se obtienen rangos de presiones muy bajos, prácticamente no significativos en la práctica debido a que por experiencia de los ingenieros de Contratista a partir de 20 PSI se presentan cambios significativos en la gráfica de torque sobre la caja reductora y por lo tanto en la gráfica de corriente del motor.

#### 5.1.2 Método 2. Balanceo por ajuste de curvas

Debido al inconveniente presentado con la utilización de la gráfica real de la corriente en el método 1, surgió la idea de obtener una gráfica de corriente ideal donde solo se tiene en cuenta los picos de corriente máximos en cada semiciclo, o sea los picos de interés para balancear la unidad. Con esto lo que se logra es suavizar la gráfica en el pico de corriente mayor, se elimina el cambio abrupto de la corriente y con esto lo que se gana es obtener un rango de variación de presión más grande que el obtenido en el método 1, ya que hay un mayor tiempo entre el pico de corriente de 21 Amp. y el pico deseado de 18 Amp. y de esta manera obtener una diferencia entre la presión actual y la deseada más significativa y poderla llevar a la práctica.

### **5.1.3 Método 3. Balanceo por CBE**

Al realizar las pruebas previas, se observó que este método fue el menos acertado. Analizando los resultados se concluyó que estos son debidos al desgaste que presentan las unidades de bombeo por su mismo uso por varios años y adicionalmente por el desbalance estructural que por fabrica estas presentan. Razón por la cual este método resulto ser no muy apropiado para el balanceo, pues las especificaciones dadas en los datos del fabricante son para condiciones normales e ideales de operación y no se cuenta con el desgaste que sufre la unidad a través del tiempo. De otro lado el valor arrojado de CBE por el TWM no es muy exacto debido a que mientras la unidad esta parada el nivel de fluido incrementa y esto afecta las cargas sobre la barra lisa y por ende la medición del CBE y este a su vez el balanceo mismo.

### **5.1.4 Método 4. Balanceo por delta de corriente experimental**

Este método resulto ser muy bueno porque por medio de este se pudo determinar una relación directa entre la corriente y la presión del cilindro. Se observó que un determinado cambio de presión produce determinado cambio en los picos de corriente, lo cual resulta útil al querer calcular de manera más aproximada el valor de presión que permite los picos de corriente deseados y de esta forma lograr el balanceo de la unidad.

Finalmente se logra obtener una mejor aproximación para balancear la unidad con este método, ya que se observa de una forma más directa la relación que existe entre la corriente del motor y la presión del cilindro utilizada para el contrabalanceo del sistema. Por medio de las pruebas realizadas experimentalmente para un delta de presión para un pozo determinado un cambio de presión produjo un cambio en el pico mayor de corriente específico.

## 6. VALIDACIÓN DEL SOFTWARE DESARROLLADO

Debido a los variados inconvenientes que se dieron para la realización de la última visita con el fin de validar el software desarrollado y medir la eficiencia de cada uno de los métodos ideados para posteriormente dejar solo uno, se procedió hacer la validación de los mismos de una forma alternativa como se describe a continuación.

Se procedió a obtener datos de corriente y presión de determinado pozo antes y después del balanceo. Esto se obtuvo del software piloto de monitoreo con el que cuenta ECOPETROL actualmente. Se observaron todos los datos de corriente del motor y presión del cilindro, momentos antes en que la unidad se detuvo por desbalanceo e igualmente se captaron los datos después de balanceada la unidad nuevamente.

Primero se muestra la gráfica de corriente del motor, la cual indica el comportamiento de la corriente durante todo un día de trabajo y en el cual se detuvo la unidad de bombeo debido al calentamiento del bobinado como consecuencia de una alta corriente que circulaba por el motor.

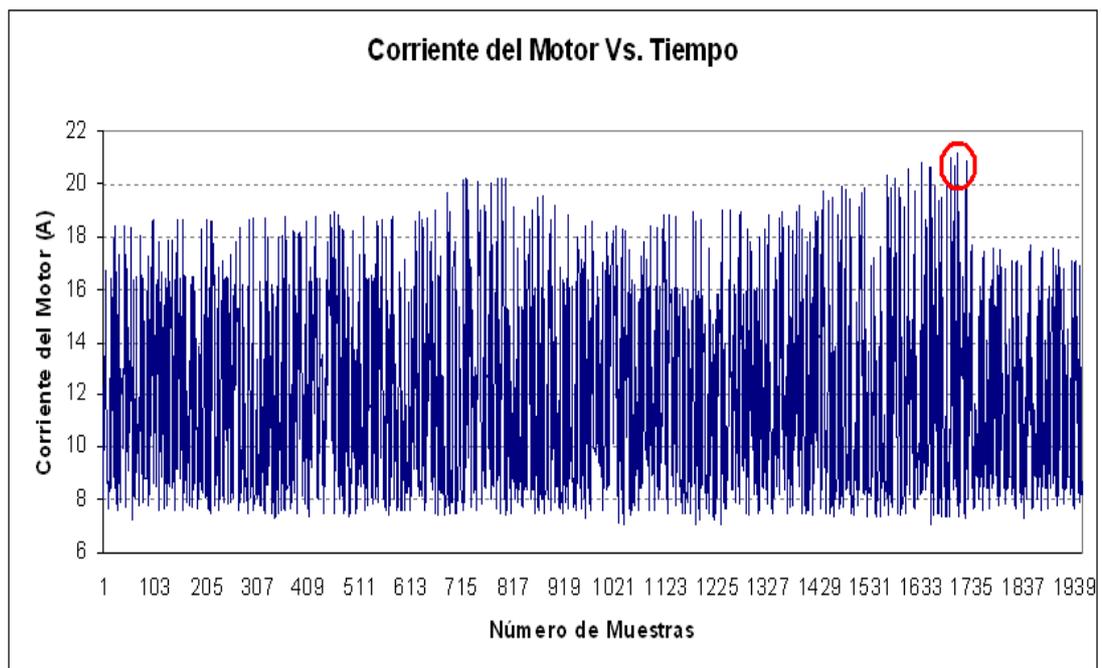


Figura 44. Corriente del motor durante un día de trabajo

Corriente en el momento del desbalanceo

Corriente Máxima = 21 A

Corriente luego de balanceada la unidad

Corriente Máxima = 18 A

A partir de los datos anteriores se decidió analizar dichos datos para obtener una gráfica aproximada de un ciclo de bombeo de la unidad en el tiempo que estuvo desbalanceada y otra cuando fue nuevamente balanceada. Esto con el objetivo de introducir esta nueva gráfica aproximada de corriente al software desarrollado y poder observar los resultados de los diferentes métodos, mirar sus mejores aspectos, unificarlos y crear uno solo. Las gráficas obtenidas son como se ve a continuación.

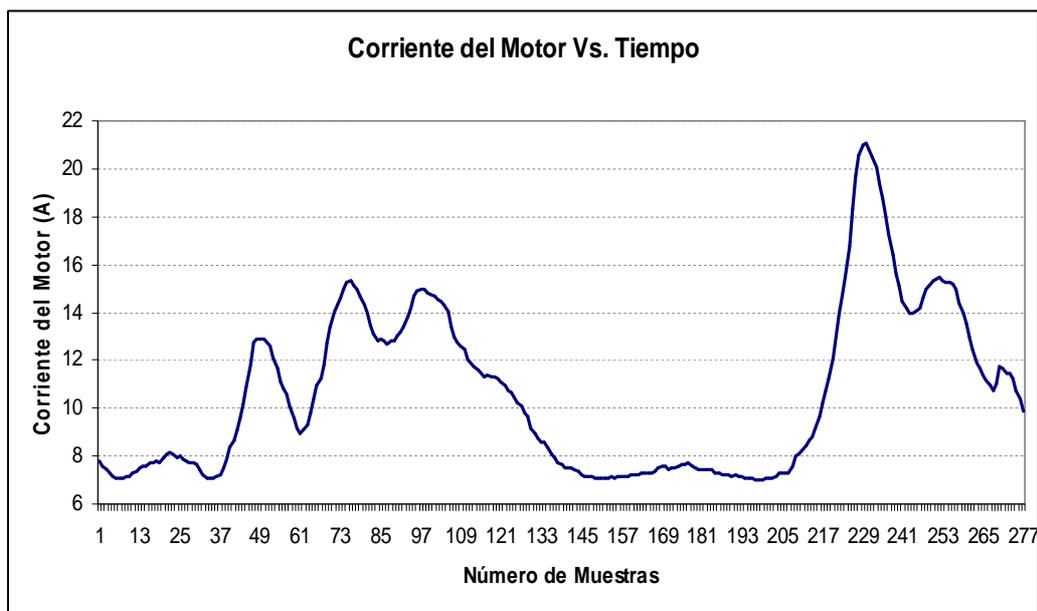


Figura 45. Corriente del motor desbalanceado

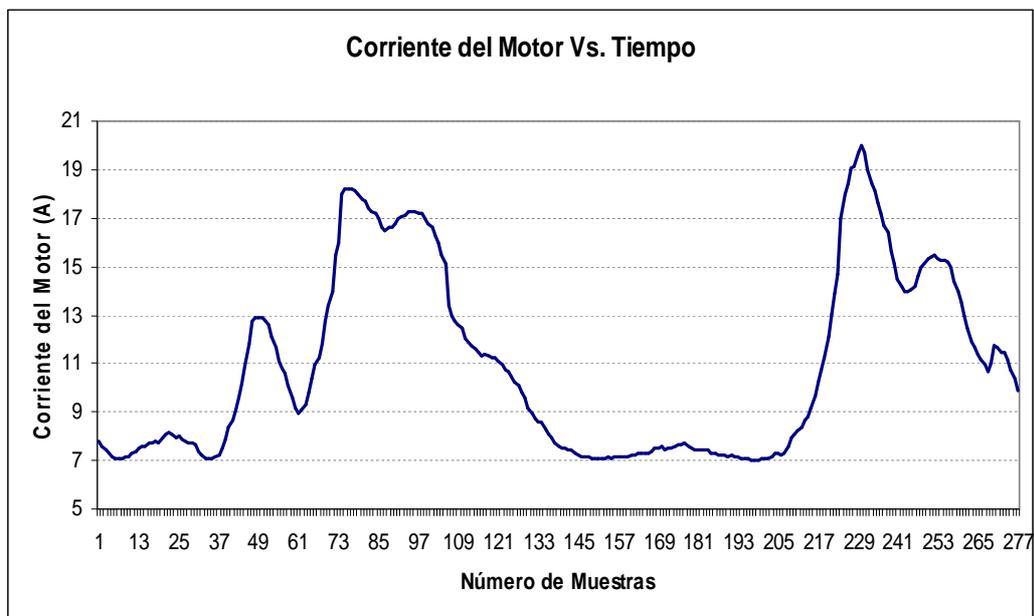


Figura 46. Corriente del motor balanceado

Al igual que con los datos de corriente, se procedió a graficar los datos de presión del cilindro de la unidad de bombeo con el objetivo de analizar su comportamiento en el transcurso del día. La siguiente gráfica ilustra el comportamiento de la presión; muestra la unidad balanceada, desbalanceada y nuevamente balanceada.

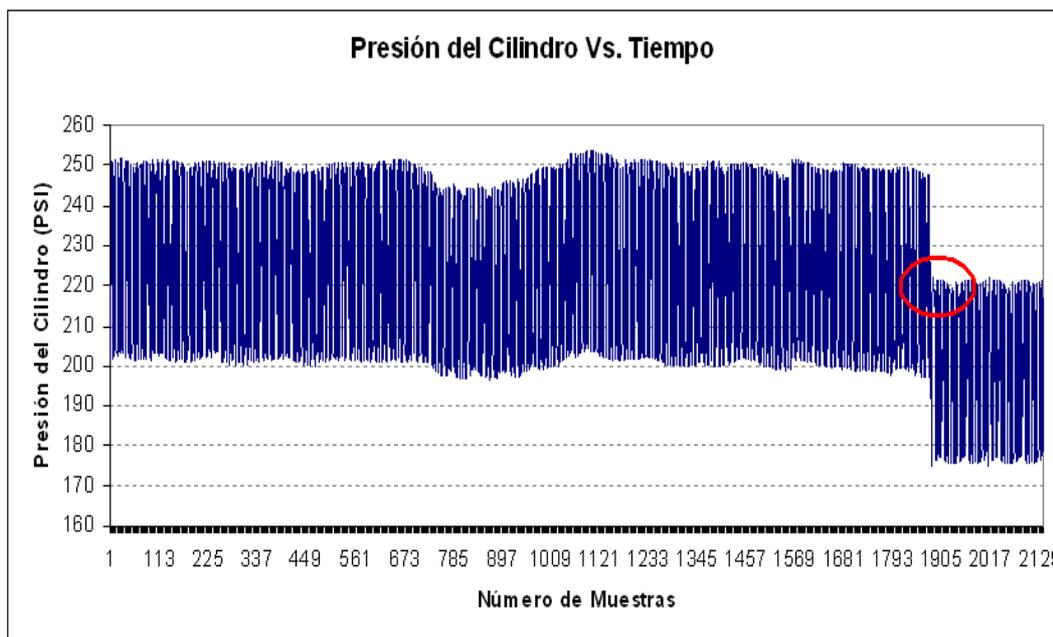


Figura 47. Presión del cilindro durante un día de trabajo

Presión en el momento del desbalanceo

Presión Máxima = 250 PSI  
 Presión Mínima = 200 PSI

Presión luego de balanceada la unidad

Presión Máxima = 220 PSI  
 Presión Mínima = 170 PSI

Una vez analizadas las gráficas anteriores se procedió a construir un archivo .PWR de potencia con el fin de cargar y graficar estos datos en el software desarrollado. Con el objetivo de obtener el rango de presión para el balanceo sugerido por el software desarrollado y compararlo con la presión que le fue suministrada al cilindro en realidad.

Inicialmente se cargó en el programa el archivo .PWR que se construyó a partir de los datos obtenidos con el programa piloto de monitoreo de los pozos de ECOPETROL. A continuación se observa el resultado:

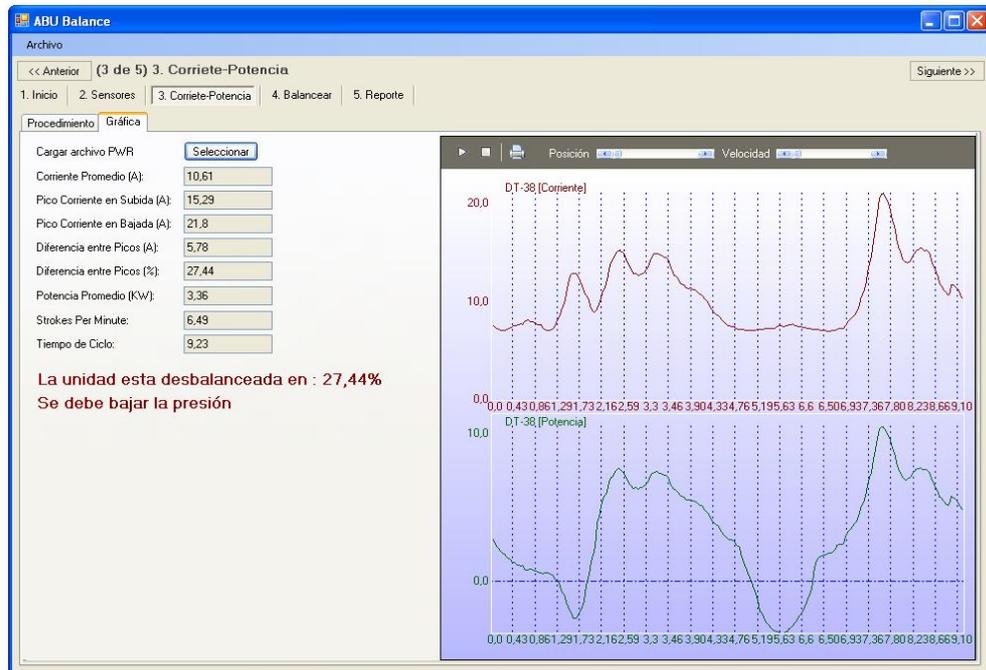


Figura 48. Gráfica de potencia en ABU Balance

Seguidamente se procede al balanceo como tal. El programa sugiere una presión máxima en un rango entre **212 y 222 PSI**. Lo cual se acerca al valor de presión máxima que el usuario en el momento le suministró al cilindro que fue de **220 PSI**.

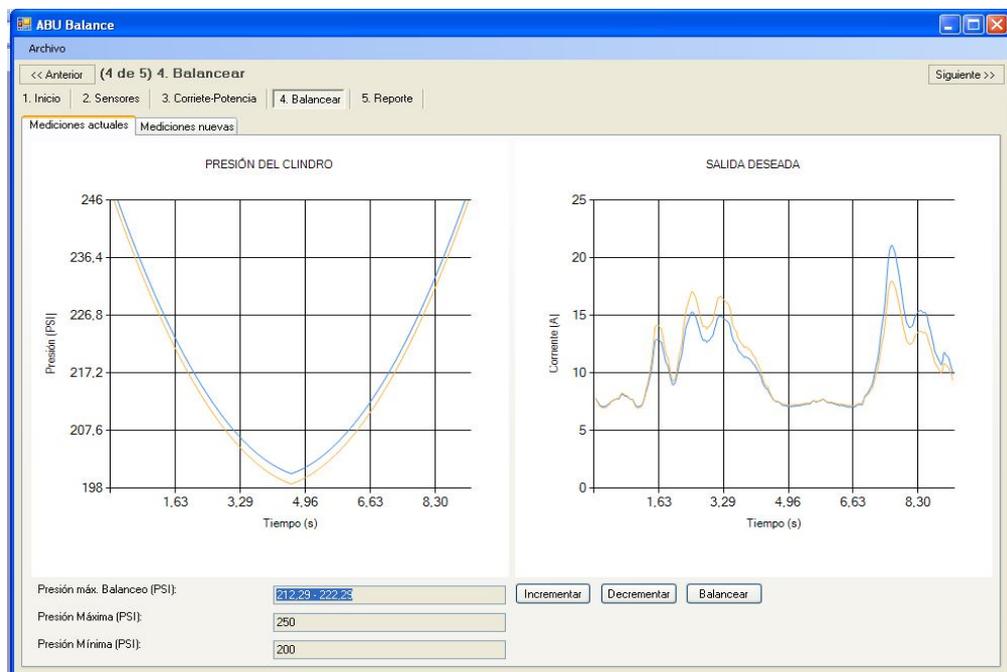


Figura 49. Gráfica de presión y corriente en ABU Balance

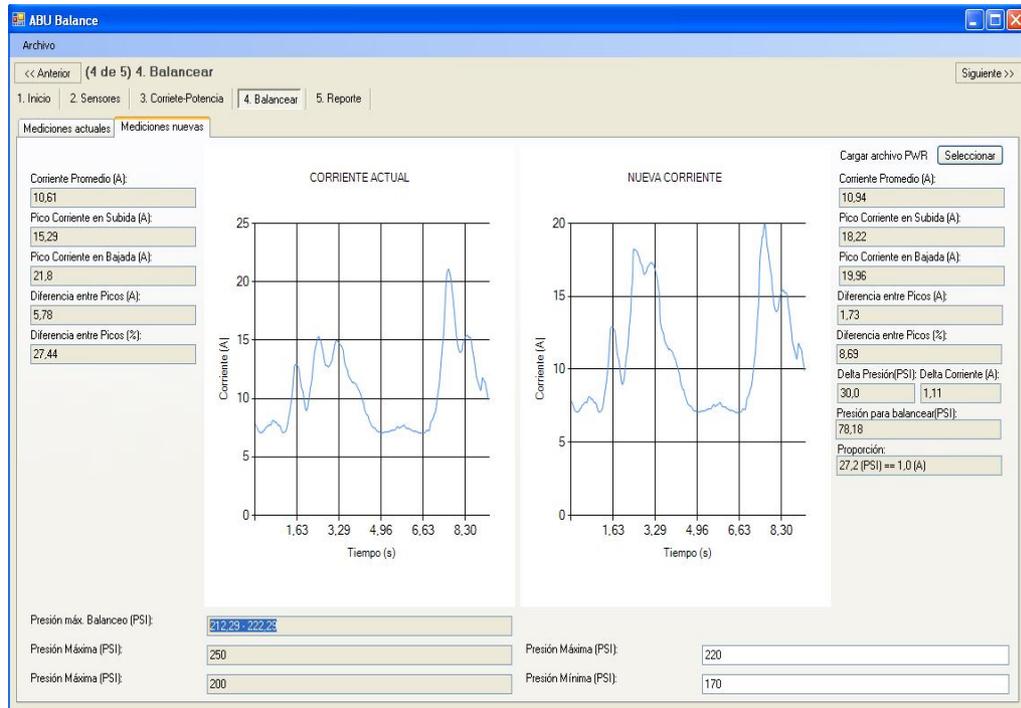


Figura 50. Gráfica antigua y nueva de corriente en ABU Balance

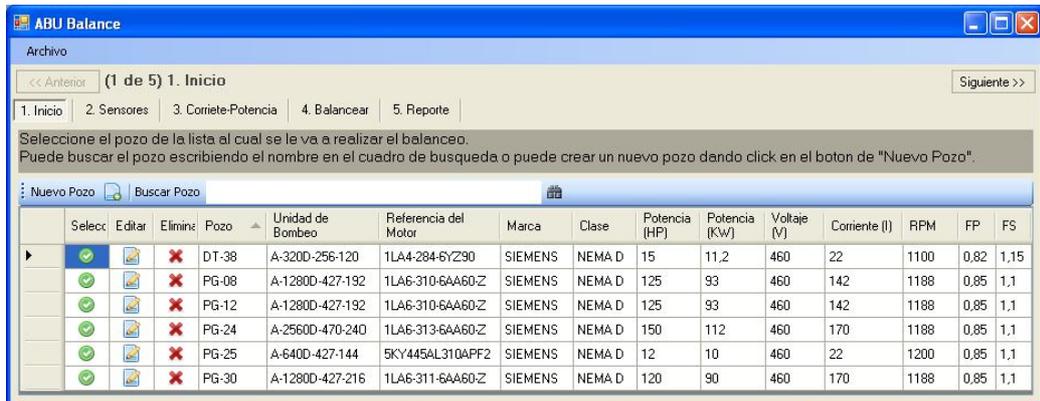
Como se observa se obtuvo un rango de presión muy cercano al valor que realmente se le suministró al cilindro para efecto de balancear la unidad y hacer volver a funcionar la unidad de bombeo y no detener la producción por un periodo de tiempo más largo. Aunque el programa no dio un valor de presión exactamente igual al valor real de presión que se le suministró al cilindro, si tuvo una muy buena aproximación.

## 7. DESARROLLO Y MANEJO DEL SOFTWARE DISEÑADO

ABU Balance (Air Balance Unit) es el nombre que se le dio al software desarrollado, en cual se realizó en Visual Studio, escrito en lenguaje C# y su objetivo esta dirigido para optimizar el balanceo de unidades de bombeo mecánico balanceadas por aire.

Se diseño la metodología adecuada a seguir, la cual se realiza en cinco pasos en donde se obliga al usuario al cumplimiento de dichos pasos y al procedimiento requerido para el óptimo balanceo.

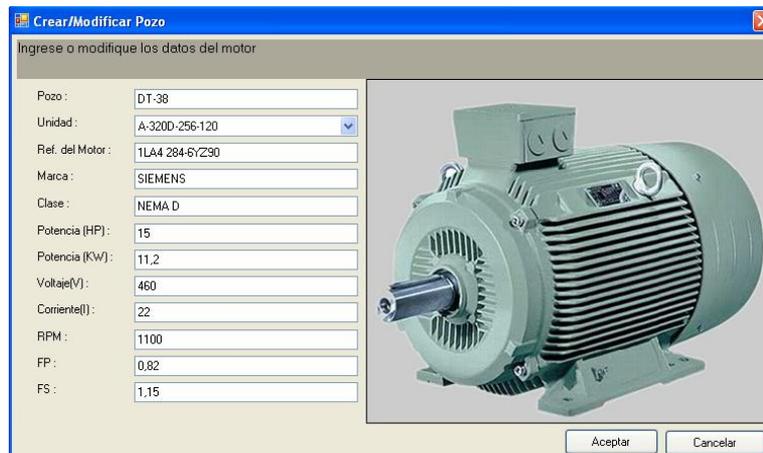
Inicialmente se indica el paso 1, donde se tiene la opción de ingresar los datos del pozo a la base de datos, se puede editar datos de determinado pozo o sencillamente eliminar un pozo de la base de datos.



	Selecc:	Editar	Elimina:	Pozo	Unidad de Bombeo	Referencia del Motor	Marca	Clase	Potencia (HP)	Potencia (KW)	Voltaje (V)	Corriente (I)	RPM	FP	FS
▶	<input checked="" type="checkbox"/>			DT-38	A-320D-256-120	1LA4-284-6VZ90	SIEMENS	NEMA D	15	11,2	460	22	1100	0,82	1,15
	<input checked="" type="checkbox"/>			PG-08	A-1280D-427-192	1LA6-310-6AA60-Z	SIEMENS	NEMA D	125	93	460	142	1188	0,85	1,1
	<input checked="" type="checkbox"/>			PG-12	A-1280D-427-192	1LA6-310-6AA60-Z	SIEMENS	NEMA D	125	93	460	142	1188	0,85	1,1
	<input checked="" type="checkbox"/>			PG-24	A-2560D-470-240	1LA6-313-6AA60-Z	SIEMENS	NEMA D	150	112	460	170	1188	0,85	1,1
	<input checked="" type="checkbox"/>			PG-25	A-640D-427-144	5KY445AL310APF2	SIEMENS	NEMA D	12	10	460	22	1200	0,85	1,1
	<input checked="" type="checkbox"/>			PG-30	A-1280D-427-216	1LA6-311-6AA60-Z	SIEMENS	NEMA D	120	90	460	170	1188	0,85	1,1

Figura 51. Paso 1. Selección del pozo

En caso que los datos del pozo no estén en la base de datos, se selecciona nuevo pozo para ingresar los respectivos datos.



Crear/Modificar Pozo

Ingrese o modifique los datos del motor

Pozo: DT-38

Unidad: A-320D-256-120

Ref. del Motor: 1LA4 284-6VZ90

Marca: SIEMENS

Clase: NEMA D

Potencia (HP): 15

Potencia (KW): 11,2

Voltaje(V): 460

Corriente(I): 22

RPM: 1100

FP: 0,82

FS: 1,15

Aceptar Cancelar

Figura 52. Paso1. Datos del pozo nuevo

A continuación el usuario se encontrará con el paso 2, denominado sensores donde se explica de forma clara y concisa el procedimiento para instalar correctamente el sensor de corriente implementado; debido a que dicho sensor no se utilizaba en el procedimiento debido al desconocimiento de su instalación y uso.

Se hace énfasis en la correcta instalación del sensor para evitar daños en el mismo o en el sistema en general. Igualmente se especifica las medidas de seguridad industrial que se deben llevar a cabo.

También en esta parte del programa el usuario debe ingresar los datos de presión que le solicita el programa, para posteriormente ser utilizados en el balanceo como tal.

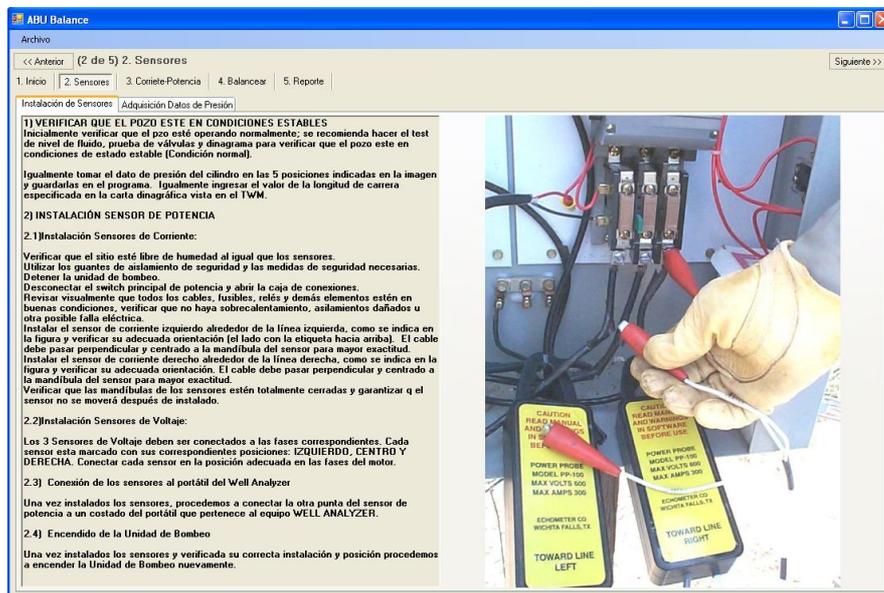


Figura 53. Paso 2. Instalación del sensor de corriente

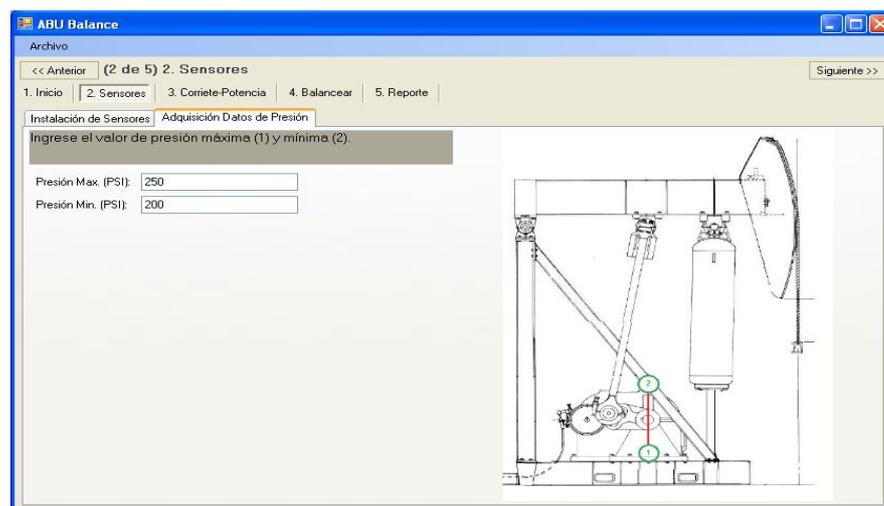


Figura 54. Paso 2. Adquisición de datos de presión

Posteriormente se dirige al usuario a la adquisición de los datos de corriente mediante el sensor instalado y el software TWM. Inicialmente se le explica como adquirir el dato para luego ser cargados y graficados, cuestión que nunca antes los operadores podían hacer.

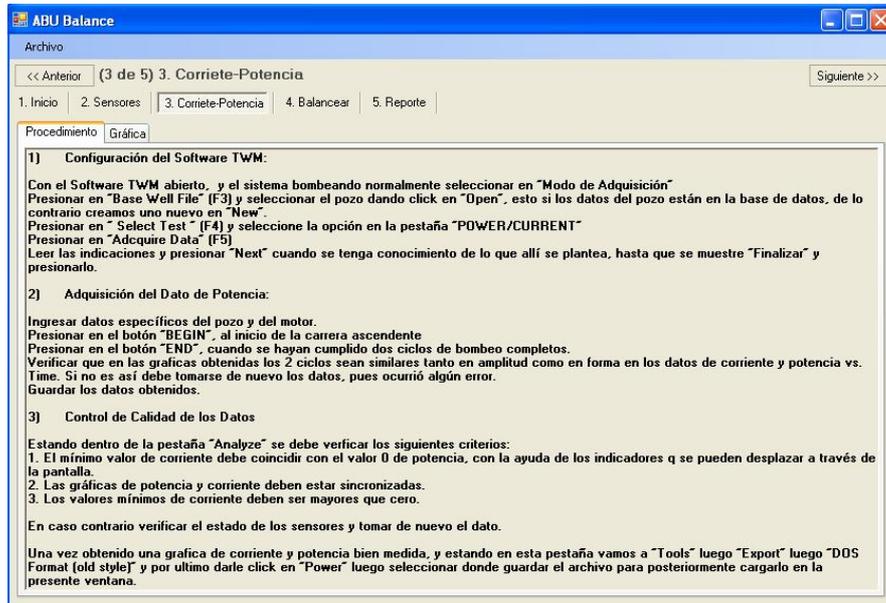


Figura 55. Paso 3. Adquisición del dato de corriente

Seguidamente el usuario abrirá la pestaña llamada gráfica donde se le pide que cargue el archivo .PWR el cual corresponde a los datos de corriente y potencia de la unidad de bombeo provenientes del TWM Software.

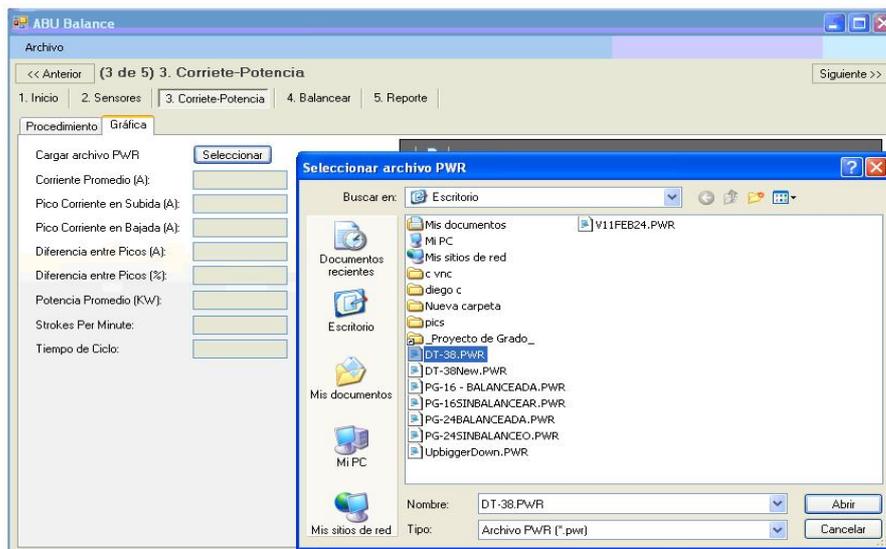


Figura 56. Paso 3. Selección del archivo .PWR

Una vez cargado el archivo correspondiente el programa muestra la respectiva gráfica de corriente y potencia del motor. También se le muestra al usuario datos importantes de la corriente, tales como los valores de los picos de corriente tanto en la subida como en la bajada del ciclo de bombeo, se muestra la diferencia en porcentaje de los picos, corriente promedio y otros datos importantes para el usuario.

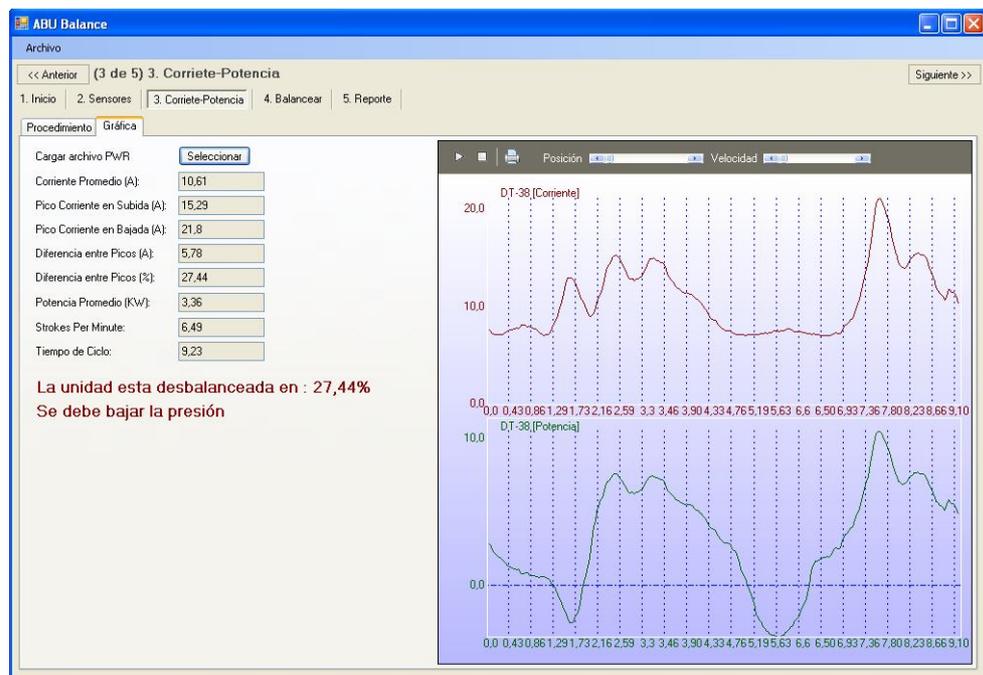


Figura 57. Paso 3. Datos de la gráfica de corriente

También el programa le informa al usuario si la unidad esta balanceada o no. Esto se realiza tomando como base el porcentaje de diferencia entre los dos picos de corriente dados en la gráfica. Si la diferencia es igual o superior al 10% se considera que la unidad esta desbalanceada, de lo contrario no se considera así.

Finalmente se llega al objetivo deseado, el cual es el balanceo de la unidad de bombeo.

Como se mencionó en los análisis de resultados de los métodos que se idearon para el balanceo, se procedió a dejar un solo método teniendo en cuenta los mejores aspectos de cada método mencionado. El único método que se dejó es como se especifica en los siguientes párrafos.

El programa le presenta al usuario inicialmente la gráfica real de corriente, la presión actual del cilindro y el nuevo rango de presión sugerido para el balanceo de la unidad. En la siguiente imagen se observa lo mencionado con anterioridad.

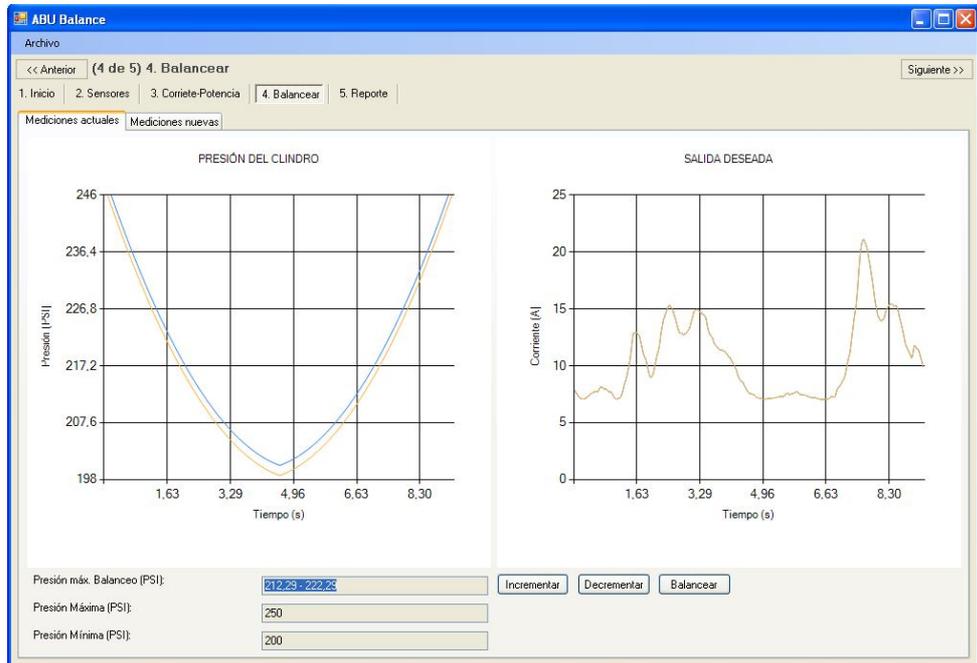


Figura 58. Paso 4. Balanceo de la unidad

Una vez el programa le sugiere al usuario el rango de presión en el cual debe estar la presión de cilindro para un correcto balanceo, este realiza el cambio de presión en el cilindro y se procede a la siguiente pestaña de este paso.

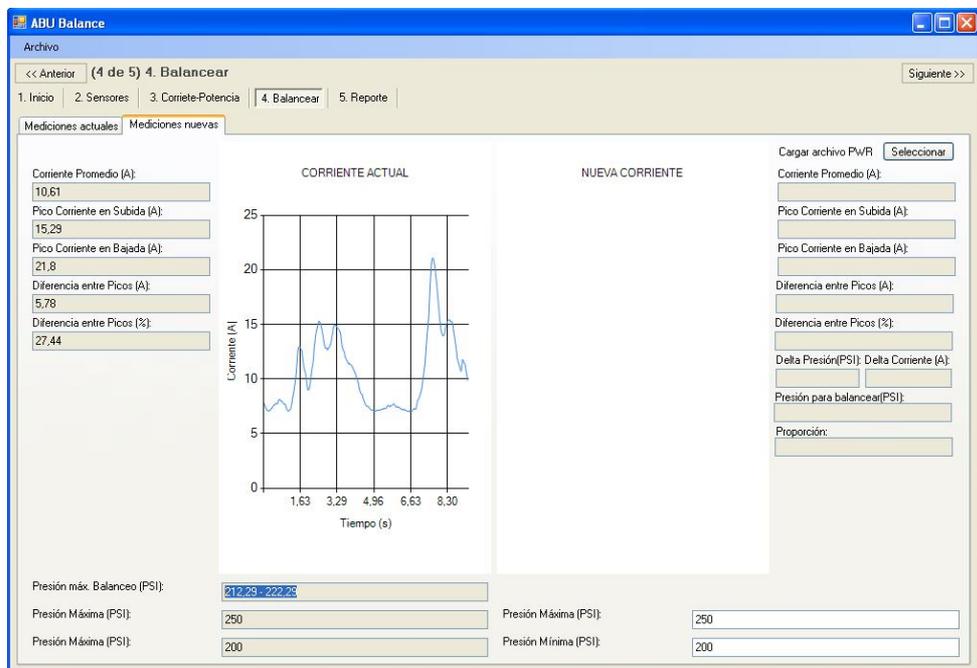


Figura 59. Paso 4. Balanceo de la unidad

En esta pestaña se le presenta al usuario la gráfica actual de corriente con los datos de interés. En este paso el usuario debe cambiar la presión del cilindro de acuerdo al rango sugerido y volver a tomar una nueva gráfica de corriente mediante el sensor de corriente del TWM y cargar nuevamente el archivo .PWR en esta pestaña. Posteriormente el programa graficará la nueva corriente y arrojará los nuevos datos de interés. Igualmente indicará el nuevo porcentaje de balanceo, la proporción entre corriente y presión del cilindro.

Para hallar dicha proporción se le debe indicar al programa cuales fueron las nuevas presiones máxima y mínima que se le introdujeron al cilindro, para que el programa realice los respectivos cálculos.

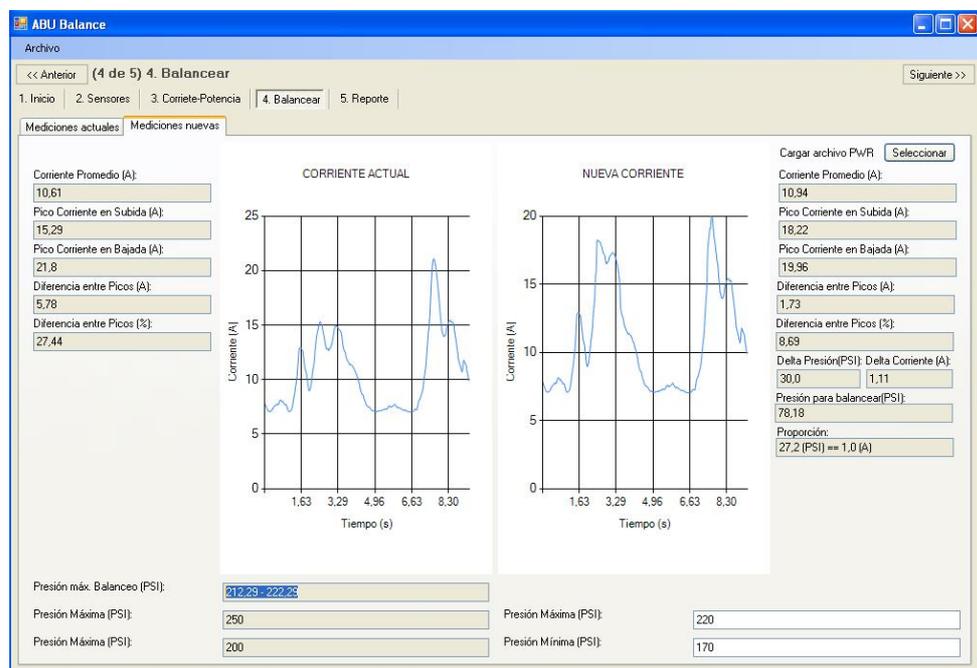


Figura 60. Paso 4. Nueva gráfica de corriente

Finalmente el programa muestra la nueva gráfica de corriente y le indica si la unidad quedó o no balanceada. En caso tal que se de un desbalanceo significativo el usuario debe repetir todo el proceso para que el programa le sugiera un nuevo rango de presión. De lo contrario se prosigue al paso final.

El paso final es un reporte de todo le proceso realizado, en donde se muestran los datos del pozo, las mediciones actuales del motor, el rango de presión sugerido y finalmente se muestra las nuevas mediciones, tanto la gráfica como los datos y las presiones con la que finalmente quedó el cilindro.

El reporte le da la opción al usuario de imprimirlo o guardar el archivo en PDF o en un documento de Excel. Como se muestra a continuación.

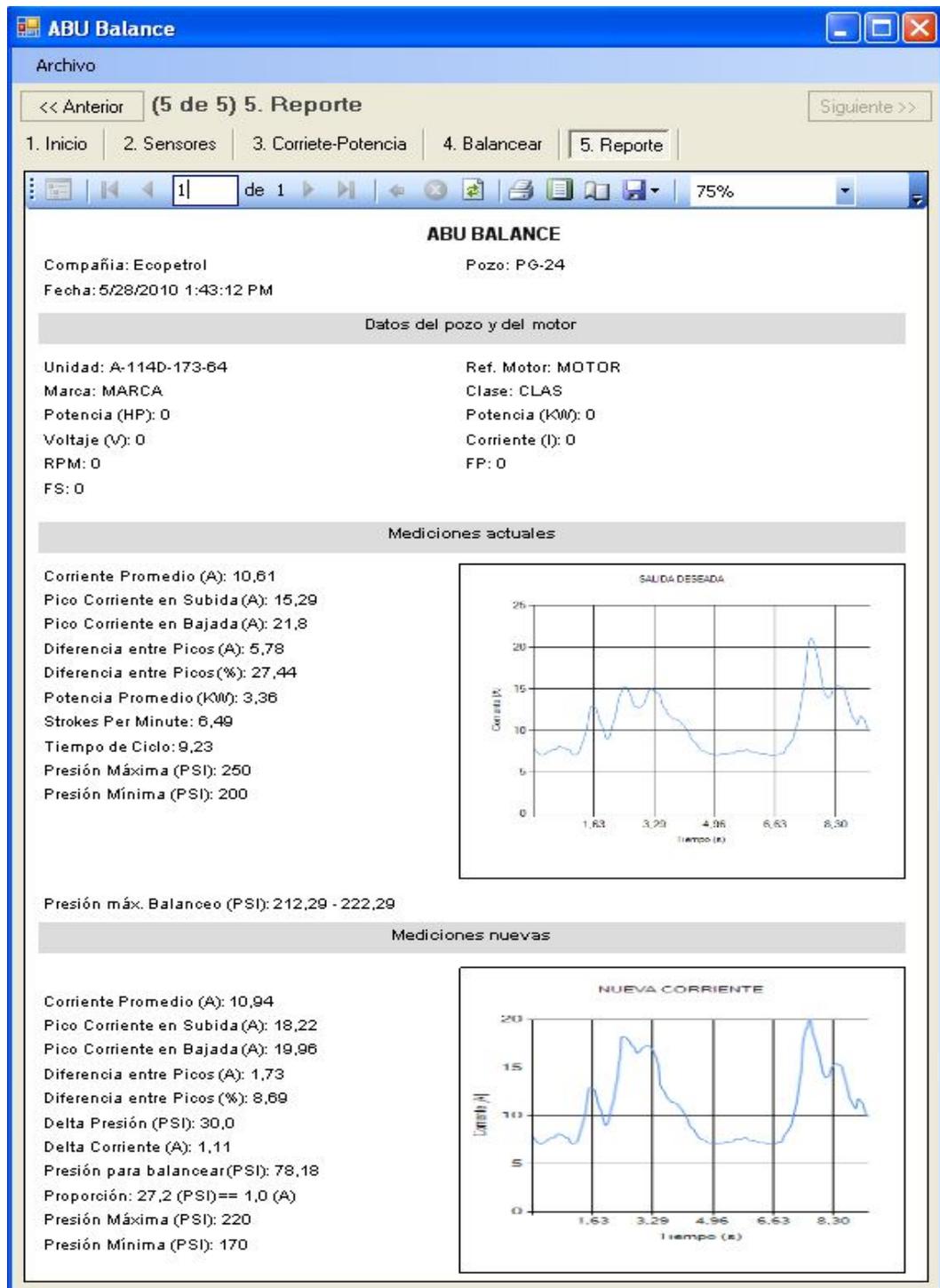


Figura 61. Paso 5. Reporte final

## 8. CONCLUSIONES

- Definitivamente el uso del sensor de corriente permitió observar de una manera mucho más fiable, real y exacta los datos de corriente, que son indispensables a la hora de realizar un balanceo amperimétrico, permitiéndolo realizar mejores análisis para optimizar el proceso de balanceo de unidades del tipo balanceadas por aire en el bombeo mecánico. Adicionalmente permite observar la corriente en todo el tiempo del ciclo de bombeo y de esta manera se puede hacer un mejor análisis y seguimiento de la corriente del motor; cuestión que no era muy óptima ya que antes solo se tomaban 4 puntos de corriente en todo el ciclo de bombeo.
- Se desarrolló un programa que mediante el seguimiento de cinco pasos, permite balancear de una manera adecuada unidades balanceadas por aire, teniendo en cuenta la parte eléctrica del motor. Dicho programa describe paso a paso la metodología que se debe llevar a cabo para que se pueda llegar a una unidad balanceada y equilibrada permitiendo ahorrar energía, evitando desgastes innecesarios en la unidad y optimizando de cierta manera el proceso de balanceo.
- Se logró encontrar una aproximación de la función de presión del cilindro de las unidades de bombeo mecánico balanceadas por aire, aprovechando los datos medidos y utilizando el ajuste de curvas mediante el programa desarrollado, que permitió hacer análisis y ajustes más reales de los que se podrían tener.
- Mediante el programa desarrollado se puede calcular aproximadamente una proporción que existe entre la presión del cilindro que realiza el efecto de contrabalanceo y la corriente que circula por la unidad motriz de la unidad, y de esta manera claramente determinar un rango de presión que se debe tener en el cilindro para que la unidad trabaje en armonía y se encuentre balanceada.
- Es muy importante que estudiantes de Ingeniería Electrónica se introduzcan en diferentes campos tan importantes y productivos como el petrolero, permitiendo que la formación profesional sea mucho más integral y que los estudiantes se puedan mostrar en este medio es un gran reto. Aunque el proceso sea un poco demorado mientras se relaciona y se adapta al medio, es muy gratificante poder contribuir y ayudar a la optimización de procesos que se realizan en una empresa tan importante en nuestra zona y en el país como lo es ECOPETROL.

## 9. RECOMENDACIONES

- Lo más adecuado para mantener balanceada una unidad de bombeo mecánico balanceada por aire sería un sistema completo AUTOMATICO que cuente con válvulas que permitan adicionar y extraer aire al cilindro en cualquier momento y un controlador inteligente que permita analizar la unidad en todo momento para determinar que tanto aire debe agregar o extraer dichas válvulas y que permita tener la unidad balanceada de forma permanente, puesto que estas unidades se balancean aproximadamente cada 15 días y se puede tener un desgaste en las unidades y un desperdicio energético.
- El proceso de balanceo en ECOPETROL se lleva a cabo de dos formas específicamente, la primera de ellas la hace la parte eléctrica en donde se realiza un balanceo amperimétrico de la unidad teniendo en cuenta netamente la corriente y teniéndose como prioridad la unidad motriz. Por otro lado la parte encargada de producción hace un balanceo teniendo en cuenta un programa llamado RODDIAG que hace un calculo de cuenta presión debe existir en el cilindro usando un análisis de torque que se deduce de la carta dinagráfica y cuya prioridad es netamente la producción. Se propone entonces que el balanceo se lleve a cabo coordinadamente entre las dos partes directamente involucradas, para así poder tener un balanceo adecuado y que no se hagan dos trabajos totalmente diferentes por aparte.
- Sería muy útil poder contar con un sensor de corriente permanente para tener información en tiempo real ya que permitiría trabajar más cómodamente y de una forma más sencilla para lograr un adecuado balanceo. De igual forma acoplar este sensor al programa desarrollado (ABU Balance) para tener los datos inmediatamente sin necesidad de abrir o ejecutar otros programas, permitiendo así un trabajo más eficiente.
- Se recomienda realizar muchas más pruebas en más pozos para encontrar datos más precisos que permitan llegar a resultados y conclusiones más generales, ya que las pruebas realizadas y la validación del programa se hizo de forma ligera y rápida por cuestiones de tiempo y perdidas que se podrían tener eventualmente a la hora de conectar y organizar todo para realizar dichas pruebas, como por ejemplo detener el pozo para instalar el sensor de corriente.

## FUENTES DE CONSULTA

### BIBLIOGRAFÍA

ECHOMETER, Company. Well analyzer and TWM software. 2006. 409 p.

LUFKIN. Air balanced pumping units.

SVINOS, John G. Optimización de Bombeo mecánico: Theta Enterprise Entrenamiento Levantamiento Artificial. Maracaibo, 2005. 292 p.

PERDOMO, Rubiano Ronal. Establecer una metodología para la optimización del levantamiento artificial por bombeo mecánico para la compañía Parko Services. Neiva, 2009. 82 p. Tesis (Ingeniero de Petróleos). Universidad Surcolombiana. Facultad de Ingeniería.

### MEDIOS TELEINFORMÁTICOS

<http://www.echometer.com/>

Paper SPE 25447. Simplified Computer-Aided Analysis of Electrical Current in Motors Used for Beam Pumping Systems.

Paper SPE 29533. Beam pump Balancing Based on Motor Power Utilization.

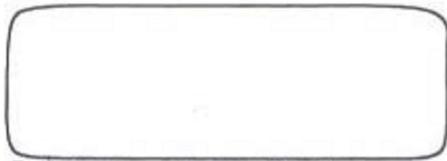
Paper SPE 37499. Motor Power/Current Measurement for Improving Rod Pump Efficiencies.

### RECURSOS HUMANOS

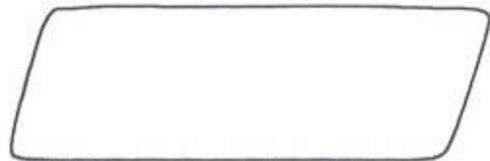
Pinto Diego. Ingeniero de Petróleos. PARKO SERVICES. Departamento de Producción

Romero Fauricio. Ingeniero de Petróleos, Especialista en Bombeo Mecánico. ECOPETROL. Departamento de Producción

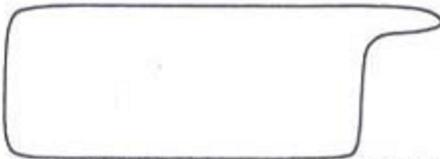
## ANEXO A. Tipos de cartas dinográficas



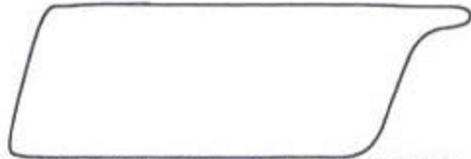
Full Pump - Anchored Tubing



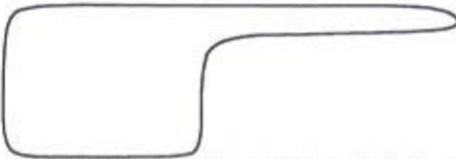
Full Pump - Unanchored Tubing  
Or Tubing Anchor not Holding



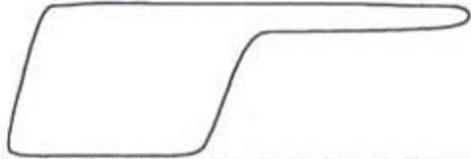
Slight Fluid Pound - Anchored Tubing



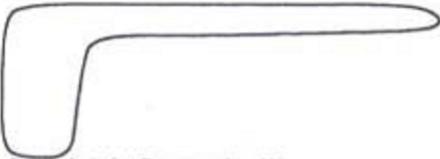
Slight Fluid Pump - Unanchored Tubing



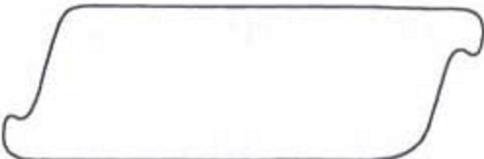
Severe Fluid Pound - Anchored Tubing



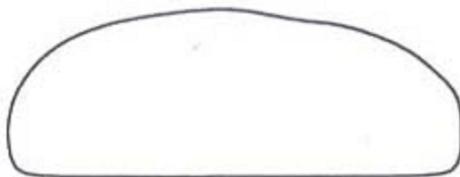
Severe Fluid Pound - Unanchored Tubing



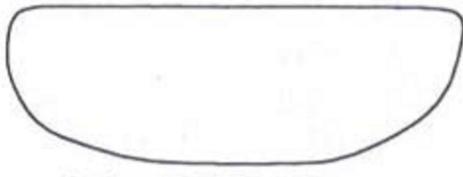
Completely Pumped off  
Anchored Tubing



Malfunctioning Tubing Anchor



Leaking Traveling Valve or Plunger



Leaking Standing Valve

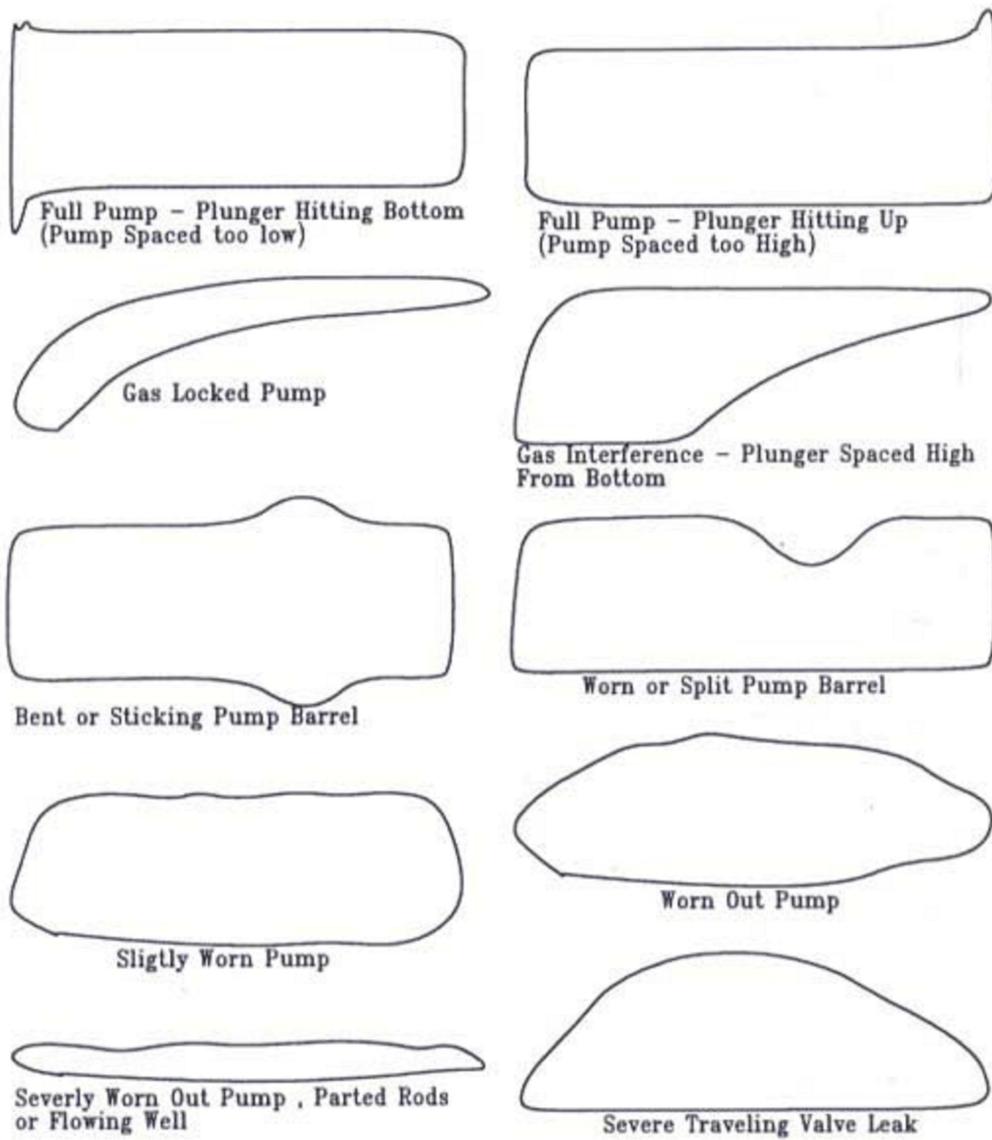


Figura 62. Tipos de carta dinográfica

## ANEXO B. Informe arrojado por el Roddiag

RODDIAG 3.1 for Windows				Page 1 of 1				
Company: Ecopetrol S.A.		© Theta Enterprises, Inc.		User: Weatherford				
Well: DT-38		Tel: (714) 526-8878		Date: 01/11/2009				
Disk file: DT-38-Noviembre-09.rdg								
Comment:								
Input Data			Calculated Results					
Run time (hrs/day):	24,0	Tubing pres. (psi):	110,0	Peak pol. rod load (lbs):	9965	Polished rod HP:	3,8	
Strokes per minute:	6,32	Casing pres. (psi):	90,0	Min. pol. rod load (lbs):	3862	Permissible load HP:	26,2	
Surf. stroke (in):	103,2	Gross prod. (bfpd):	50	System eff. (Motor->Pump):	15%	PRHP / PLHP:	0,14	
Fluid level (ft from surface):	2869	Fluid level (ft over pump):	604	Buoyant rod weight (lbs):	5581	Unit struct. loading:	39%	
				Max. rod loading:	29%	Gearbox loading:	70%	
Fluid Properties		Motor & power meter		Required prime mover size for existing conditions		BALANCED	EXISTING	
Water cut:	42%	Power meter:	Detent	NEMA D motor:	10 HP	10 HP		
Water sp. gravity.:	1,0	Electr. cost:	,00/KWH	Single/double cyl. engine:	10 HP	10 HP		
Oil API gravity:	20,0	Type:	NEMA D	Multicylinder engine:	10 HP	10 HP		
Fluid sp. gravity:	0,962	Size:						
Unit: Lufkin Air-Balanced (A-320D-256-120)				Torque analysis and electricity consumption		BALANCED	EXISTING	
API size:	A-320-256-120 (unit ID: AL54)			Peak g'box torq. (M in-lbs):	143	225		
Crank hole #2 (out of 3)				Gearbox loading:	45%	70%		
Calc. stroke length (in):	103,2			Cyclic load factor:	1,96	1,92		
Rotation with well to right:	CW			Max. air tank pres. (psig):	217	250		
Air tank pressure at bottom-of-stroke (psig):	250			Daily electr. use (KWH/day):	118	119		
				Monthly electric bill:	\$0	\$0		
				Electr. cost per bbl. fluid:	\$0,000	\$0,000		
				Electr. cost per bbl. oil:	\$0,000	\$0,000		
Dyna. data source: "DT-38-Noviembre-09.dyn" (286)				Tubing, pump and plunger calculations				
Date dyna. card was recorded: "11-11-2009, 09:58"				Tubing movement (in):	0,0	FL load on pump (lbs):	2556	
Traveling valve load (lbs):				8126800	Gross pump stroke (in):	94	FL lev. (ft from surf.):	3424
Standing valve load (lbs):				5620406	Gross pump displ. (bfpd):	156	FL lev. (ft over pump):	49
Tubing and pump information				Appar. net stroke (in):	37	Pump int. pres. (psi):	124	
Tubing O.D. (in):	2,875	Rod-tub. frict.:	1,00	Eff. net stroke (in):	37	Pump vol. efficiency:	32,2%	
Tubing I.D. (in):	2,441	Pump type:	Insert	Net str. displ. (bfpd):	61	Pump fillage:	39%	
Plunger size (in):	1,5	Pump depth (ft):	3473,0			Est. pump frict. (lbs):	836	
		Tubing is not anchored						
Rod string (service factor: 0,9)				Rod string stress analysis				
Diameter (inches)	Rod Grade	Length (ft)	Min. Tensile Strength (psi)	Stress Load %	Top Max. Stress (psi)	Top Min. Stress (psi)	Bot. Min. Stress (psi)	Stress Calc Method
0,875	Norris 97	1150	140000	26%	16516	6699	3857	API MG T/2.8
0,75	Norris 97	2323	140000	29%	16216	5038	-1893	API MG T/2.8

NOTE: Stress calculations do not include buoyancy effects.

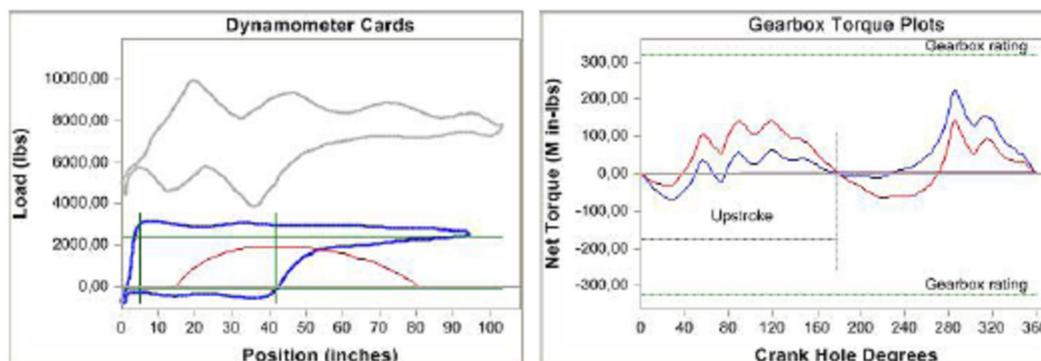


Figura 63. Informe proporcionado por Roddiag