

Monitoreo automático de pozos producidos con unidades de bombeo mecánico

Gustavo Moreno (YTEC), Fernando Sanchez (YTEC), Abel Garriz (YTEC), Marcelo Olmedo (YPF), Mariano Hunkeler (RFI), Pablo Severini (RFI)

La dinamometría es la herramienta de diagnóstico por excelencia en pozos explotados con aparatos individuales de bombeo. Este procedimiento de medición permite inferir el estado del sistema y, particularmente, de la bomba en fondo mediante la lectura de la carta dinamométrica, con el objetivo de guiar acciones de optimización. En la actualidad existen múltiples unidades comerciales de monitoreo y control para estos equipos que son utilizadas donde es necesario controlar la marcha del aparato para evitar el golpe de fluido (condición de *pump-off*). En este trabajo exhibimos un desarrollo local que tiene como objetivo extender el rango de aplicación de este tipo de unidades de monitoreo a pozos de baja producción, buscando resolver los puntos claves que hacen económicamente viable la instalación de este instrumental en este tipo de pozos. En este desarrollo se han incorporado aspectos novedosos de diseño, como comunicación inalámbrica entre sensores y procesamiento de datos con clasificación automática del estado productivo in-situ a través de un procesador dedicado. En este trabajo se describen estos aspectos y los algoritmos de análisis utilizados para calcular la carta dinamométrica de fondo y su clasificación. Los mismos son una adaptación específica de métodos de reconocimiento de patrones, optimizados para aprovechar las capacidades limitadas de un procesador de señales digitales. La implementación del sistema se ejemplifica con un piloto de campo desarrollado en el activo Pico Truncado-El Destino operado por YPF S.A.

1. Introducción

La dinamometría es la herramienta fundamental de control para pozos de productores explotados con aparatos individuales de bombeo. La medición en superficie típicamente involucra registrar la carga sobre el vástago y la carrera del mismo en función del tiempo. Estos datos pueden utilizarse para inferir la carga y desplazamiento de la bomba en fondo resolviendo una ecuación de ondas unidimensional con disipación, la ecuación de Gibbs [Gibbs-63], que representa la dinámica elástica de la sarta de varillas. Los datos medidos permiten resolver el problema con condiciones de contorno en superficie para calcular la dinámica en fondo. Al graficar la carga y desplazamiento en fondo (carta dinamométrica de fondo) es posible identificar los problemas que ocurren en el funcionamiento de la bomba, como golpe de bomba o de fluido, pérdidas en válvulas, etc, e inferir cantidades de interés, como el porcentaje de llenado del barril [Takacs-15]. Actualmente la medición, cálculo y reporte de datos se realiza de manera automática con unidades de control, comercialmente conocidas como *pump-off controllers* o *well managers* [Weatherford-11, Lufkin-06]. Generalmente las mismas permiten registrar los datos de dinamometría y procesar la carta de superficie para obtener la carta de fondo. El sistema generalmente puede usar los datos calculados y parámetros *seteados* para controlar el pozo automáticamente maximizando la producción sin dañar la instalación.

En este trabajo describimos el desarrollo de una unidad de este tipo que permite una implementación económica y flexible, que se ha adaptado específicamente a la operación de YPF SA. La misma cuenta con funcionalidades novedosas como un método de identificación de patrones que permite, además de calcular la carta de fondo, clasificarla. Se ejemplifica con mediciones de campo cómo es posible utilizar datos de los sensores comúnmente instalados en el dinamómetro

para obtener más información sobre la dinámica. Particularmente, mostramos cómo el acelerómetro utilizado para medir el cambio de orientación del travesaño permite registrar además las vibraciones de la estructura debidas al golpe de bomba.

2. Desarrollo

En las siguientes secciones se describe el hardware y firmware del proyecto. Lo que se buscó como objetivo fue generar un sistema de medición económico en comparación con un *pump-off* comercial y simultáneamente adaptado a las necesidades de YPF. Un problema sumamente importante que se resolvió fue la instalación y cableado de los equipos. Los controladores de pozo cableados presentan la desventaja de que es necesario disponer de cuadrillas especiales para la instalación, zanjeo, etc. Además los cables quedan generalmente colgados de partes móviles de AIB, particularmente el cable proveniente de la celda de carga se deja sunchado desde los estrobos hasta alguna parte fija de la estructura. Esto es inconveniente no sólo para la instalación sino para las intervenciones del pozo por otras cuadrillas. Entonces, se diseñó un sistema de comunicación inalámbrico que permitió transmitir los datos de la celda de carga y el inclinómetro al controlador, instalado directamente junto con el tablero eléctrico del pozo. Ambos sensores inalámbricos fueron alimentados a pila con una autonomía suficiente para un año de duración y se controlan automáticamente desde el concentrador/controlador instalado junto al tablero de alimentación del AIB a unos 30m de boca de pozo. Este factor representaría una reducción importante en el costo de instrumentación para una masificación ya que el sistema se instala de manera directa sobre el AIB, sin necesidad de intervenir el pozo con cuadrillas especiales, y la disposición final es sumamente compacta y robusta.

Por otro lado, el controlador se diseñó en base a un microcontrolador de 32 bits que es muy potente y lo suficientemente flexible para incorporar métodos de análisis que se ejecuten *in situ*. Ciertamente el desarrollo es completamente personalizable en el aspecto de procesamiento de señales. Aquí se describe un flujo que, a partir de los datos de superficie, infiere la carta dinamométrica de fondo y la clasifica.

2.1 Hardware

En la Figura 1 se muestra un diagrama en bloques del sistema y su disposición en la locación. La señal de la celda de carga es amplificada y digitalizada en un módulo que se puede comunicar por radio frecuencia (RF) hasta el concentrador/controlador. Análogamente el acelerómetro que permite inferir la posición del vástago midiendo el cambio de orientación respecto de la vertical, transmite sus datos a ese punto en la locación por RF. Ambos sensores funcionan a pilas y son despertados y sincronizados periódicamente cuando se requiere una nueva medición. Los datos colectados se pueden procesar *in situ* con el módulo de cálculo que se instala en el controlador (junto al tablero del pozo). Los datos crudos se almacenan en una memoria como *back up* y se transmiten a un servidor. Por simplicidad en la prueba de concepto del sistema se utilizó un módulo GPRS, pero el paquete de datos puede ser inyectado de cualquier otra forma (ejemplo otro equipo de transmisión de radio) en el sistema SCADA.

La diferencia fundamental con otros equipos comerciales como el SAM [Lufkin-06] o el Wellpilot [Weatherford-11] radica en que los sensores son inalámbricos y el módulo de cálculo es abierto, esto es, es posible incorporar cualquier algoritmo de análisis en él. Si bien los sensores son inalámbricos, la resolución y velocidad de muestreo son las mismas que para sensores cableados. Los datos se almacenan temporalmente en el sensor hasta que son transmitidos al controlador. Las pruebas mostraron que la autonomía de los sensores es de aproximadamente un año utilizando 4 pilas tamaño D y tomando una carta por hora.

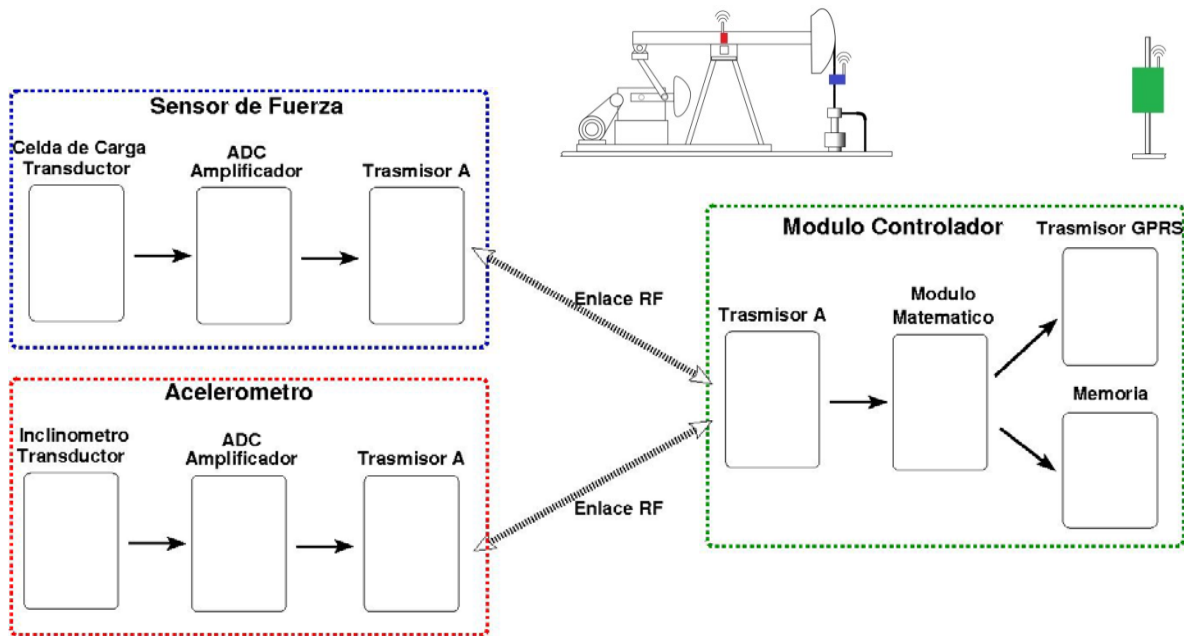


Figura 1: Diagrama en bloques del sistema y su disposición en la locación. En rojo se indica el acelerómetro, azul la celda de carga y verde el controlador.

Los sensores se caracterizaron en laboratorio y en pruebas dentro de las instalaciones de TANDANOR S.A. donde se utilizó la celda de carga en condiciones más exigentes que las de campo. Típicamente se tuvieron resoluciones de ± 0.1 grado para la detección de cambios de orientación con el inclinómetro y $\pm 2\text{kg}$ (20N) para el ruido típico en la celda (@ 9ton).

2.2 Firmware

El firmware del sistema contiene por un lado la administración de los módulos y por el otro los algoritmos de análisis que se ejecutan sobre un módulo de cálculo dedicado. El procesamiento de los datos medidos se divide en cuatro fases. En la primera se utilizan los datos para detectar eventos por fuera del funcionamiento normal, como por ejemplo si el AIB está parado o existe una pesca. Si la fase 1 indica que el sistema está en operación se continúa con las siguientes fases para diagnosticar el funcionamiento. En la fase 2 se utilizan los datos de superficie para calcular la carta de fondo, posteriormente en la fase 3 se clasifica la carta de fondo determinando la condición operativa de la bomba. En la fase 4 se post-procesan estos datos para calcular cantidades de interés

para la optimización del sistema de extracción. A continuación describimos brevemente cada una de estas fases.

Fase 1: Detección de eventos anómalos

Al recibir los datos de los sensores, antes de pasar a calcular la carta de fondo, se analizan ciertos parámetros que permiten detectar situaciones anómalas. Como primer paso se detecta si el AIB se encuentra en funcionamiento, para eso, se analizan los datos de posición recibidos y se determina la máxima amplitud alcanzada por el movimiento. Si dicho valor no supera un umbral predefinido, se considera que la bomba se encuentra parada y se detiene el proceso de diagnóstico.

Si la bomba no se encuentra detenida, se verifica que la sarta no esté cortada. Si todo lo anterior se valida con éxito, se procede a calcular la carta de fondo, tal como se describe en la siguiente sección.

Fase 2: Cálculo de carta de fondo

Una vez que se acepta la condición de operación cíclica, los datos de superficie se utilizan para calcular la carta de fondo. Esto se hace resolviendo la ecuación de Gibbs [Gibbs-63], que es una ecuación de ondas 1D con disipación. En la implementación específica de este proyecto se utiliza un método basado en transformada rápida de Fourier FFT. Con la medición de carga y posición del vástago se resuelve el problema en modo diagnóstico, esto es, con las condiciones de contorno en superficie se calcula la carta de fondo.

Fase 3: Diagnóstico

Existe más de una manera de diagnosticar el funcionamiento del sistema a través de la carta de fondo. La estrategia utilizada en nuestro caso es detectar ciertas propiedades locales en la carrera ascendente y descendente, y finalmente clasificar las propiedades globales de la carta. Por propiedades locales se entiende eventos dinámicos que ocurren en un intervalo temporal pequeño, como por ejemplo el golpe de la bomba o el desplazamiento del anclaje. Por propiedades globales se entiende aquellas que caracterizan la dinámica de casi toda la carta, como la forma típica del diagrama cuando existe presencia de gas o pérdida en una válvula. Este último paso se realiza buscando el vecino más cercano en una base de datos clasificada e indexada que se almacena en la memoria del microcontrolador. El resultado es una clasificación que permite incorporar más de una falla o problema operativo al mismo tiempo, es decir, es posible por ejemplo identificar golpe de bomba en el punto muerto inferior y golpe de fluido en la misma carta.

Existen otros métodos documentados en la bibliografía que basan las comparaciones en diferentes descriptores geométricos [Abello-93]. A nuestro criterio esto es de mayor utilidad en el caso de disponer de una base de cartas reales clasificadas manualmente, ya que la comparación con una base sintética puede introducir errores.

El procesador tarda aproximadamente 400ms en calcular la carta de fondo utilizando el método FFT, y entre 200ms a 4000 ms en calcular la clasificación, dependiendo del método que se elija para buscar el mejor ajuste a la base de datos.

Fase 4: Post-Proceso

La clasificación de la carta de fondo se realiza con una base patrón relativamente acotada. Si bien esto permite una clasificación robusta, algunas cantidades (como por ejemplo el llenado de la bomba) deben ser recalculadas por otro método utilizando la carta patrón como una primera estimación. Particularmente en el caso de detectar golpe de fluido o interferencia de gas se ingresa a una función que permite estimar el llenado de bomba iterativamente, corrigiendo por los efectos de compresión de gas [Takacs-15].

3. Mediciones en Pico Truncado-El Destino

En esta sección se describe la implementación del desarrollo en una prueba piloto en el yacimiento YPF-Pico Truncado. El sistema se montó sobre un pozo y se lo configuró para tomar un registro por hora. El sistema permite mantener esta tasa de medición por más de un mes de funcionamiento continuo operando el con pilas AA. En la Figura 2 se muestra un ejemplo del montaje en la locación. El mismo, al ser totalmente inalámbrico es sumamente ágil. El inclinómetro dispone de anclaje magnético, sólo es necesario apoyarlo sobre el travesaño para que quede instalado en su posición final. La electrónica de la celda de carga se atornilla a los estrobos del AIB y el controlador se puede atornillar a un poste junto al tablero. La maniobra sólo lleva unos minutos.



Figura 2: Instalación del sistema en el pozo PT-089 del yacimiento Pico Truncado operado por YPF.

En la Figura 3 se muestran los datos crudos de la medición que recibe el microcontrolador desde los sensores (celda de carga y acelerómetro/inclinómetro). De estos datos ya es posible observar que en el momento en el que se registra el golpe de bomba en la celda de carga se obtiene simultáneamente una señal de alta frecuencia en el acelerómetro.

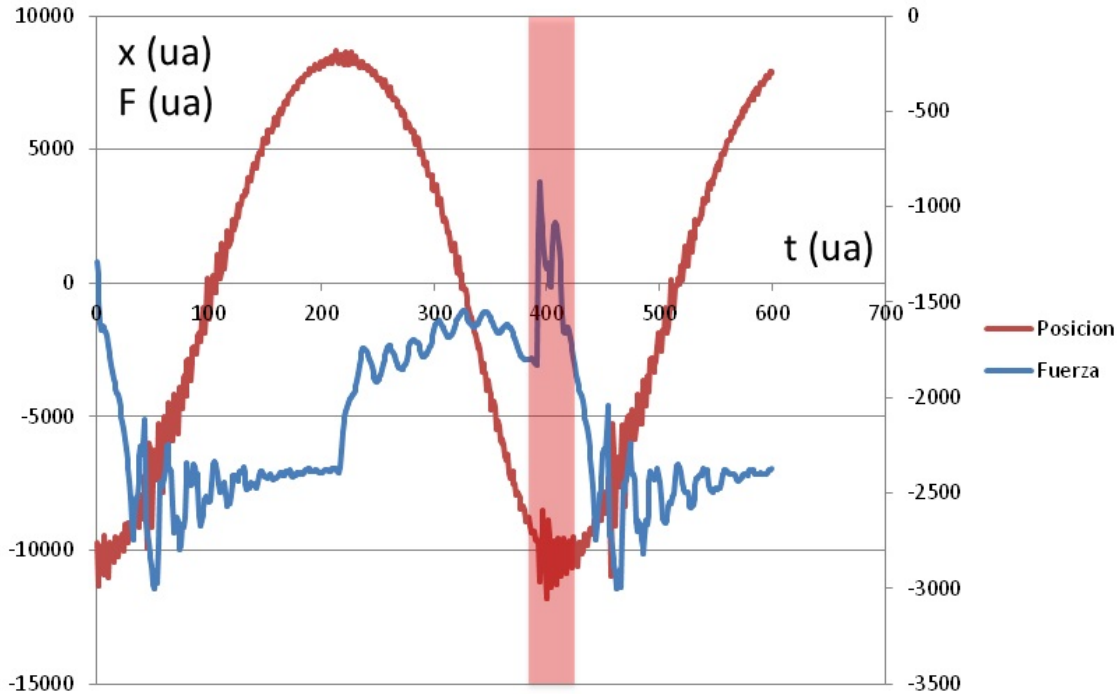


Figura 3: Datos crudos de los sensores celda de carga y acelerómetro para la prueba en el PT-89. En una banda roja se indica el momento en el que se produce el golpe de bomba en fondo.

La aceleración puede descomponerse con un filtro de Fourier en una señal de baja frecuencia, asociada a la variación de la proyección del campo gravitatorio a medida que el travesaño cambia de posición, y otra de alta frecuencia que contiene los efectos de vibración en la estructura del AIB. Es decir la señal que mide el acelerómetro es de la forma:

$$a = a_g + a_v \quad [1]$$

donde a_v es un término de alta frecuencia asociado a la vibración de la estructura y

$$a_g = g \sin(\theta) \quad [2]$$

proviene de la proyección del campo gravitatorio g sobre el travesaño a medida que este cambia su orientación θ respecto de la horizontal. Dado que ambas componentes están muy separadas en el espacio de frecuencia es posible desacoplarlas con un filtro de Fourier. En la Figura 4 se muestra tal descomposición, allí el efecto del golpe de bomba es evidente. En algunas publicaciones se ha propuesto utilizar únicamente un acelerómetro para detectar problemas como golpes de bomba o de fluido. Particularmente en la patente [Berger-97] se plantea justamente dicha implementación

combinada con un método, no descripto, de procesamiento de señales para inferir la presencia de las anomalías. De las mediciones presentadas aquí se observa que esto es factible y resultaría muy sencillo identificar este tipo de vibraciones calculando la energía en altas frecuencias. Naturalmente disponer de una celda de carga da mucha más información, pero un acelerómetro sólo puede ser utilizado para detectar problemas evidentes si se busca una instrumentación de muy bajo costo. Una manera de cuantificar la energía debida a vibraciones es sumando las componentes de Fourier de la señal en alta frecuencia para una pequeña ventana alrededor de cada tiempo. En la Figura 5 se muestra tal medida vs. tiempo junto con la señal de la celda de carga. La suma de los cuadrados de los coeficientes de Fourier en alta frecuencia dan una medida de la energía vibratoria en función del tiempo, en la Figura 5 se representa esta suma normalizada al máximo. Allí resulta claro el aumento en las vibraciones de la estructura cuando la celda de carga registra el golpe de bomba antes de llegar al punto muerto inferior. Dado que la componente de baja frecuencia mide la carrera del vástago y la de alta frecuencia las vibraciones, es posible entonces correlacionar perfectamente un punto de la carrera y un evento de shock sobre la sarta. Esto muestra claramente que usando únicamente un acelerómetro podrían identificarse tanto golpes de bomba como de fluido, y en este último caso incluso estimarse un porcentaje de llenado.

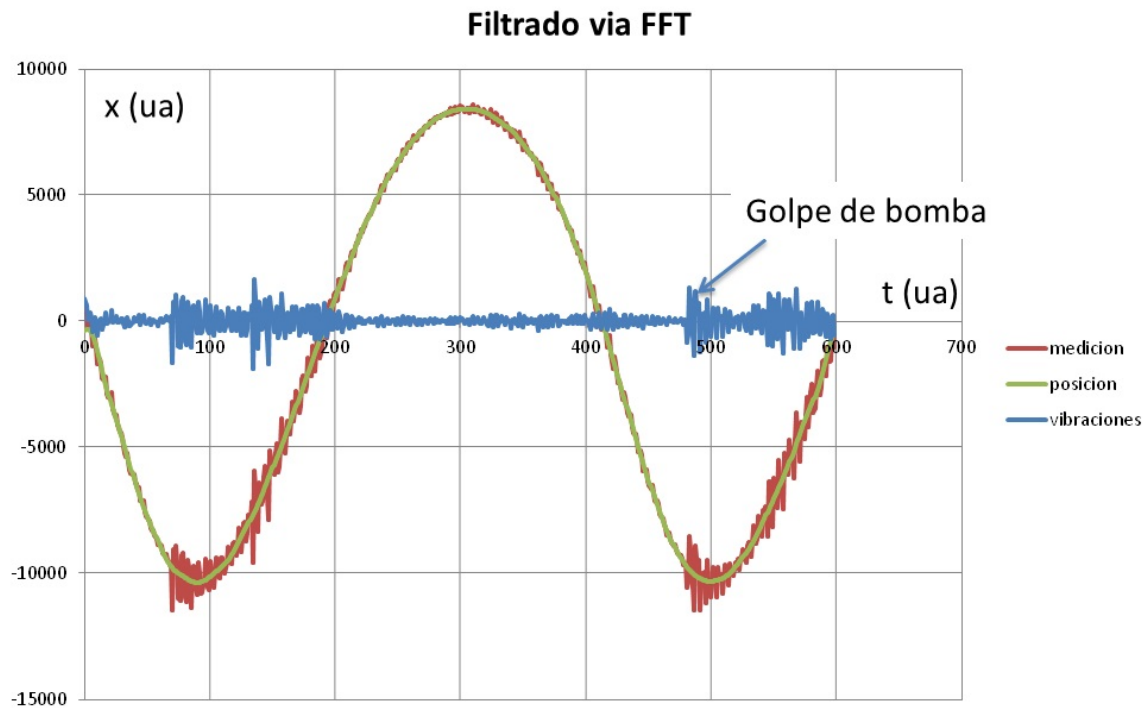


Figura 4: Descomposición de la señal del acelerómetro en una componente de baja frecuencia, que mide el cambio de orientación y otra de alta frecuencia que da información de la vibración de la estructura completa. La componente de alta frecuencia da una evidencia clara de la presencia del golpe de bomba.

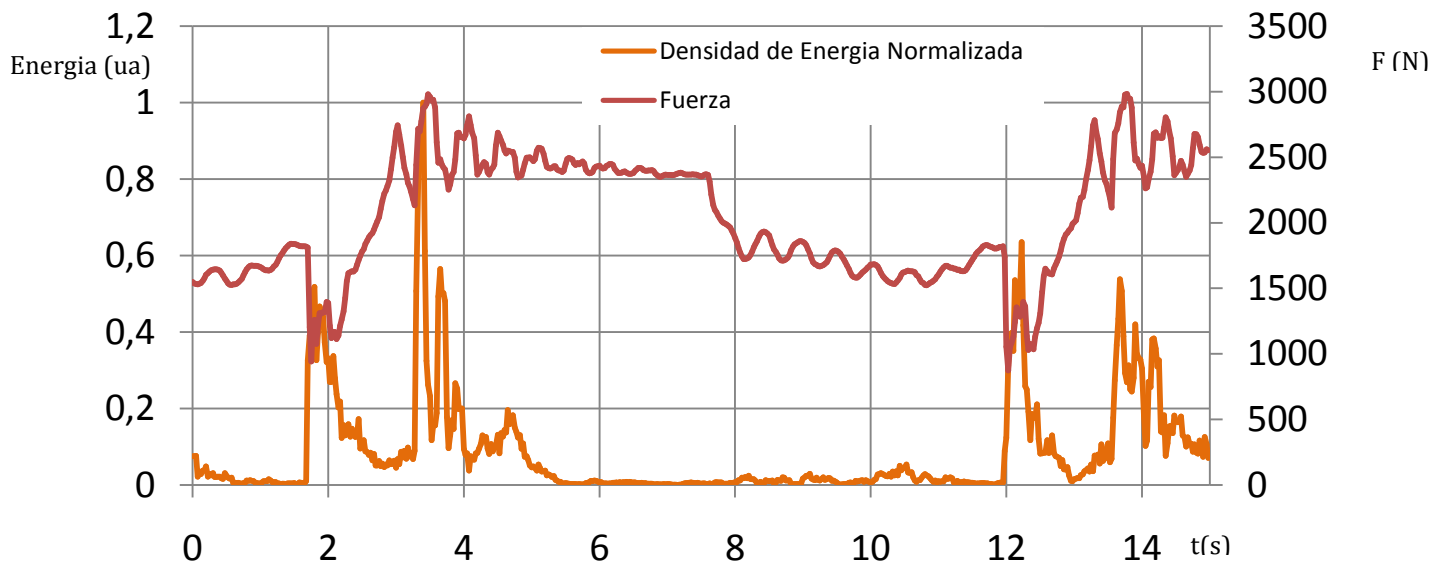


Figura 5: Energía vibratoria normalizada en función del tiempo y fuerza en la celda de carga en función del tiempo. El pico inicial permite inferir el momento y posición en la carrera descendente en que se produce el golpe.

Para la medición estándar en la que se utiliza el acelerómetro como inclinómetro combinado con la celda de carga, los sensores se calibran y caracterizan previo a la instalación, los datos se guardan en el microcontrolador para su posterior procesamiento (ejemplo cálculo de carta de fondo). Las señales calibradas para este mismo pozo en particular se muestran en la Figura 6. En esta figura se representan carga (en Kg) y posición (en m) medidos en superficie por el sistema como función del tiempo. Los mismos junto con la información de la sarta de varillas se utilizan para calcular la carta dinamométrica de fondo. Para esto el microcontrolador utiliza un método de diagnóstico basado en transformada rápida de Fourier (similar a [Gibbs-66]). El coeficiente de disipación de la ecuación de Gibbs es el único parámetro con cierto grado de incertidumbre que debe ser estimado para realizar el cálculo de fondo. El mismo se estimó utilizando otras cartas del mismo pozo, existen algunas alternativas para resolver esto también de manera automática en ciertas situaciones [Pons-11]. En la Figura 7 se muestran las cartas de fondo y superficie.

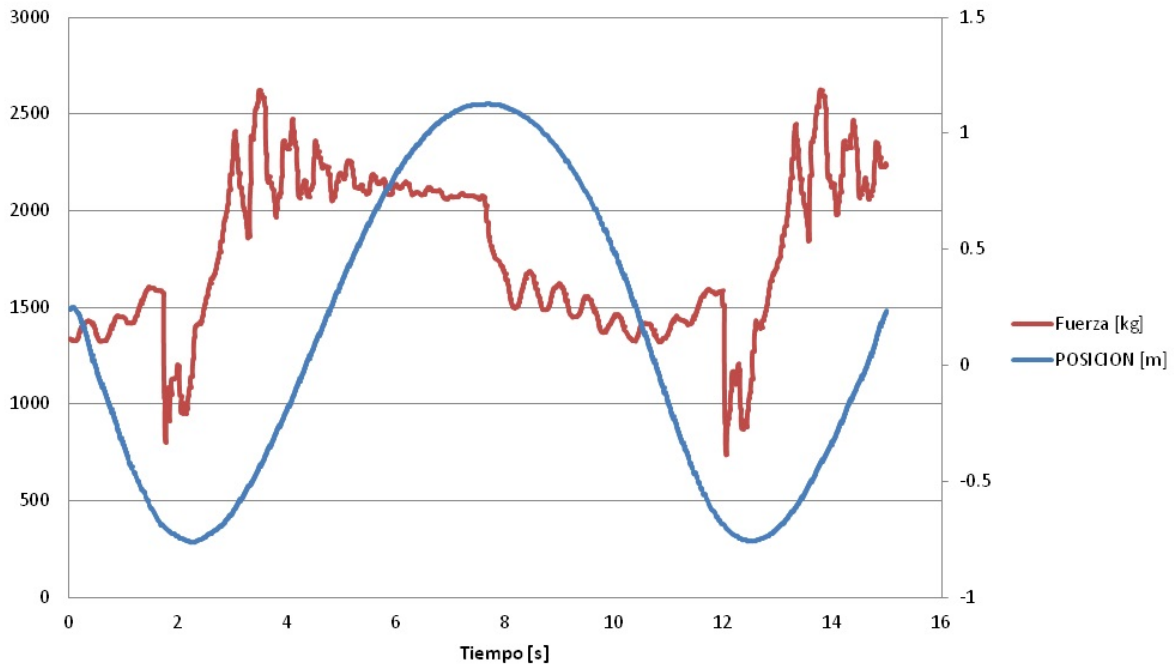


Figura 6: Carga y posición vs. tiempo para la prueba en el YPF-PT-089.

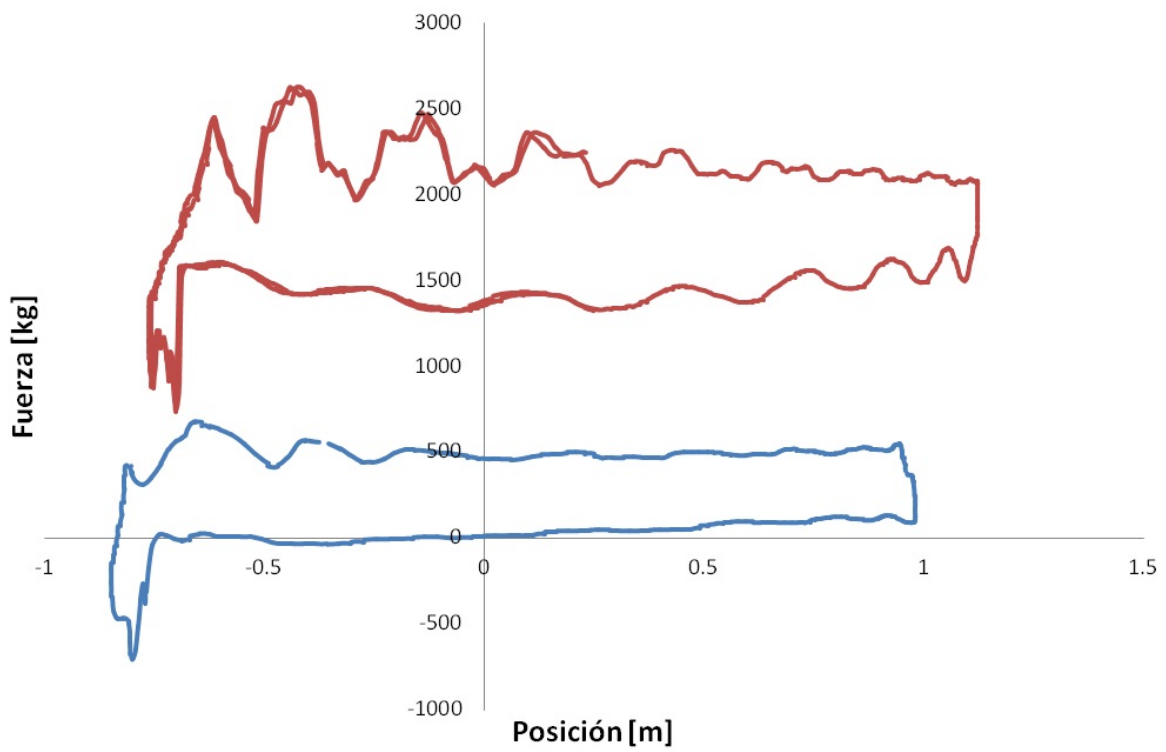


Figura 7: Cartas de superficie y fondo para el pozo YPF-PT-089.

La carta de fondo es calculada en el microcontrolador de 32 bits. El resultado luego se analiza para obtener una clasificación automática como se describe en la sección firmware. El método de clasificación provee una serie de parámetros que permiten definir la gravedad de las anomalías presentes. En el caso del ejemplo que se presenta más arriba se obtiene como resultado un problema grave de golpe de bomba en el punto muerto inferior, aunque el llenado de la bomba es eficiente.

Conclusiones

En este trabajo mostramos que es posible resolver de manera económica la dinamometría de pozos en bombeo mecánico con equipos que además pueden mejorar los aspectos operativos. El equipo desarrollado es sumamente simple de instalar y mantener, y abre la posibilidad de evaluar nuevos algoritmos de control y explotar datos típicamente descartados por los controladores comerciales.

Agradecimientos

Agradecemos la cooperación de Tandanor S.A.C.I. y N. por facilitar un AIB de fabricación propia donde se ensayaron los sensores de este proyecto.

Referencias

[Abello-93] J. Abello, A Houang and J. Russell. *A Hierarchy of Pattern Recognition Algorithms for the Diagnosis of Sucker Rod Pumped Wells*. Computing and Information - ICCI'93, Fifth International Conference on Computing and Information, Sudbury, Ontario, Canada, May 27-29, 1993, Proceedings.

[Berger-97] Eric Lee Berger, Michael Kelley Houghton, James Craig Pauley. *Method and apparatus for enhancing pump-off controller performance*. CA2242505 A1 (1997).

[Gibbs-63] S. G. Gibbs. *Predicting the Behavior of Sucker-Rod Pumping Systems*. Journal of Petroleum Technology 15 issue 07 (1963). SPE-588-PA.

[Gibbs-66] S.G. Gibbs and A.B. Neely. *Computer Diagnosis of Down-Hole Conditions In Sucker Rod Pumping Wells*. SPE-1165-PA, Journal of Petroleum Technology **18** (1) (1966).

[Lufkin-06] *SAM Well Manager user manual*. Lufkin Automation. V 1.06 (2006).

[Pons-11] Victoria M. Pons. *Calculating Downhole Pump Card With Iterations on Dual Damping Factors*. US20130115107 A1 (2011).

[Takacs-15] G. Takacs. *Sucker-Rod Pumping Handbook: Production Engineering Fundamentals and Long-Stroke Rod Pumping*. Gulf Professional Publishing; 1 edition (2015).

[Weatherford-11] WELLPILOT, *Guia de configuracion del Rod Pump Optiomization Controller*. Weatherford. Octubre 2011.

Breve CV de los autores

G. A. Moreno es Dr. en Cs. Físicas, trabaja en YPF desde 2011, y como tecnólogo en YTEC desde 2013, desarrollando modelos numéricos para diferentes áreas del upstream.

F. Sanchez es Mgter. en Cs. Físicas, trabaja en YPF desde 2010, y como tecnólogo en YTEC desde 2014 en la jefatura de I+D Yacimientos.

A. E. Garriz es Mgter. en Cs. Físicas, trabaja en YPF desde 2009, y como tecnólogo en YTEC desde 2013 en la jefatura de I+D Yacimientos.

M. Olmedo es Ing. Producción Operativo de YPF, trabaja en el Yacimiento Pico Truncado-El Destino desde 2012.

P. Severini es Ing. Electrónico, trabaja en RF-industrial desde 2013 desarrollando diversos proyectos de comunicaciones.

Mariano Hunkeler es desarrollador y fundador de RF-Industrial, con más de 20 años de experiencia en desarrollos electrónicos.