

SELECCIÓN DE LA INSTRUMENTACIÓN DE UN POZO EN CAMPO ESCUELA  
COLORADO: VARIABLES DE SUPERFICIE

ANDRES CAMILO VELASQUEZ PEÑALOZA  
DIEGO FERNANDO SANCHEZ FLOREZ  
ANDRES FELIPE VELASQUEZ RODRIGUEZ



UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y  
TELECOMUNICACIONES  
BUCARAMANGA

2012

SELECCIÓN DE LA INSTRUMENTACIÓN DE UN POZO EN CAMPO ESCUELA  
COLORADO: VARIABLES DE SUPERFICIE

ANDRES CAMILO VELASQUEZ PEÑALOZA  
DIEGO FERNANDO SANCHEZ FLOREZ  
ANDRES FELIPE VELASQUEZ RODRIGUEZ

Trabajo de grado para optar al título en Ingeniería Electrónica

Director

MSc. JULIO AUGUSTO GÉLVEZ FIGUEREDO

Codirector

MSc. JORGE ENRIQUE MENESES FLÓREZ



UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y  
TELECOMUNICACIONES  
BUCARAMANGA

2012

## TABLA DE CONTENIDO

<b>INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>14</b>
<b>1. VIBRACIÓN.....</b>	<b>16</b>
1.1. INSTRUMENTOS .....	16
1.1.1. Sonda de proximidad .....	16
1.1.2. Acelerómetro .....	18
1.1.3. Dispositivo propuesto.....	20
1.1.4. Switch de Vibración .....	20
1.2. Monitoreo de la Vibración .....	20
<b>2. MÉTODOS DE ANÁLISIS DE VIBRACIONES .....</b>	<b>23</b>
<b>3. POSICIÓN Y VELOCIDAD.....</b>	<b>24</b>
3.1. Transductor de la viga viajera (Inclinómetro) .....	24
<b>4. CARGA.....</b>	<b>25</b>
4.1. Celda de carga de medición permanente .....	27
4.2. Celda de carga montada en viga viajera.....	28
<b>5. MEDICIÓN DE PAR O TORQUE .....</b>	<b>28</b>
<b>6. TEMPERATURA .....</b>	<b>29</b>
<b>7. LUBRICACIÓN.....</b>	<b>30</b>
7.1. Instrumentos .....	30
7.2. Sensor de Nivel .....	31
7.3. Sensor de Condición General.....	32
7.4. Monitoreo de la Lubricación .....	32
<b>8. CONCLUSIONES.....</b>	<b>34</b>
<b>9. RECOMENDACIONES.....</b>	<b>35</b>
<b>REFERENCIAS.....</b>	<b>37</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA .....</b>	<b>40</b>

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Posibles ubicaciones tanto del dispositivo como del acelerómetro(Contorno rojo). .....	19
Figura 2. Esquema físico de un sistema de Monitoreo.....	19
Figura 3. Posibles ubicaciones móviles del dispositivo propuesto. ....	21
Figura 4. Ubicación del Switch de Vibración. ....	22
Figura 5. Transductor de la viga viajera. ....	25
Figura 6. PRT. Transductor de Barra pulida.....	26
Figura 7. Celda de carga. ....	26
Figura 8. Celda de carga de medición permanente.....	27
Figura 9. Dispositivos de medición de temperatura.....	29
Figura 10. Piscina de aceite de la caja reductora.....	31
Figura 11. Ubicación de los sensores de lubricación. ....	32

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Características de Instrumentos para medir Vibración.....	17
Tabla 2. Tipos de señales de salida de los sensores.....	22
Tabla 3. Características de la Celda de Carga.....	27
Tabla 4. Características de la Celda de Carga Montada en Viga.....	28
Tabla 5. Señales de salida de los instrumentos para lubricación.....	33

## RESUMEN

### TÍTULO:

Selección de la Instrumentación de un Pozo en Campo Escuela Colorado: Variables de Superficie.\*

### AUTORES:

Andrés Camilo Velásquez Peñaloza \*\*  
Diego Fernando Sánchez Flórez  
Andrés Felipe Velásquez Rodríguez

**PALABRAS CLAVE:** Fuerza, Par, Lubricación, monitoreo, posición, Vibración.

### DESCRIPCIÓN

Este documento abarca la propuesta de Instrumentación para un Sistema de Bombeo Convencional en Campo Escuela Colorado, en este se exponen las variables de superficie estudiadas y se analiza la viabilidad del monitoreo y la investigación de la información que entrega cada una de ellas sobre el sistema.

Las variables de superficie en estudio son la Vibración, Posición, Torque, Fuerza y Lubricación, discutiendo la factibilidad de su instrumentación para cada una de ellas, en función de su desempeño y los requerimientos dados por las condiciones del pozo colorado 33.

Las visitas realizadas al CEC aportaron a la caracterización del sistema permitiendo conocer su funcionamiento e identificar las fallas que se presentan dentro del sistema, como por ejemplo la falla en el pin, para lo cual se propone un dispositivo de medición de vibración orientado en este punto.

Luego de un análisis detallado de todos los parámetros y condiciones que rodean la medición de cada una de las variables planteadas, se propuso la instrumentación que cumplan con los requerimientos de la normatividad vigente, las características del pozo y el desempeño de cada uno de los equipos seleccionados con el fin realizar un monitoreo que ayude a la implementación de un mantenimiento predictivo que ahorre costos y a la optimización de la producción de los pozos.

---

\* Trabajo de grado

\*\* Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas - Escuela de Ingeniería Eléctrica, electrónica y Telecomunicaciones – Director Msc. Julio Augusto Gélvez Figueredo – Codirector Msc. Jorge Enrique Meneses Flórez

## ABSTRACT

**TITLE:**

Selección de la Instrumentación de un Pozo en Campo Escuela Colorado: Variables de Superficie.\*

**AUTHORS:**

Andrés Camilo Velásquez Peñaloza  
Diego Fernando Sánchez Flórez  
Andrés Felipe Velásquez Rodríguez

**KEYWORDS:** Force, Torque, Lubrication, monitoring, position, Vibration.

This document covers the proposed Instrumentation for Conventional Pumping System in Campo Escuela Colorado, in this paper the studied variables of unit surface are exposed, and is analyzed the feasibility of monitoring and research of the information supplied by each of them.

The surface variables under study are Vibration, Position, Torque, Force and Lubrication, discussing the feasibility of its implementation for each of them, depending on their performance and the requirements given by conditions of well Colorado 33.

Visits to the CEC contributed to the characterization of system operation, allowing the knowledge and identification of the faults that occur within the system, such as pin failure, for which we propose a vibration measuring oriented device about this point.

After a detailed analysis of all parameters and conditions about the measurement of each of the variables involved, it was proposed instrumentation that meets the requirements of current regulations, the characteristics of the well and the performance of each one of the selected equipment, to carry out its monitoring and help to implement a predictive maintenance to save costs and optimize well production.

---

\* Final Graduate Project

\*\* Physical-Mechanical Engineering Faculty – Electric, Electronic and Telecommunications Engineering School– Director Msc. Julio Augusto Gélvez Figueredo – Co-director Msc. Jorge Enrique Meneses Flórez.

## INTRODUCCIÓN

La universidad Industrial de Santander y la Empresa Colombiana de Petróleos Ecopetrol mediante el convenio Interadministrativo de Cooperación Empresarial con Fines Científicos y tecnológicos, ha cedido una serie de Pozos ubicados en el Campo Colorado. Estos pozos se encuentran en recuperación y son unos de los objetivos de CEC, estimulando la investigación y el desarrollo económico y social, y se ha dedicado tiempo y esfuerzo en la implementación de técnicas de diagnóstico de la condición de las unidades de Bombeo y de los pozos con el fin de aumentar la producción y ahorrar costos por fallas de la unidad.

La instrumentación que actualmente se encuentra en los pozos es poca o inexistente por lo que no es posible realizar un monitoreo permanente que logre identificar problemas del fondo y fallas mecánicas de la Unidad de Bombeo Convencional, y de esta forma incrementar la producción de los pozos del campo y consolidar una base de datos con información de la unidad, de forma que sea posible tomar decisiones de mantenimiento y de procesos en ésta.

Para monitorear permanentemente el campo existen cuatro grupos de variables que se deben instrumentar, que son las de superficie, fondo de pozo, cabezal del pozo, y las eléctricas. Este trabajo se enfoca en las variables de superficie, que son la vibración, la lubricación, la fuerza, posición y velocidad. Este grupo de variables permiten conocer el estado de las piezas que conforman la unidad de bombeo convencional.

El monitoreo de la variable de vibración en la caja multiplicadora, en el motor y en la unidad misma, puede determinar averías tempranas que representan costos mayores debido a daños graves, ya que al implementarse un mantenimiento correctivo, y no preventivo y predictivo, se pueden generar daños catastróficos en la Unidad de Bombeo al tal punto de parar la unidad y detener la producción de esta. Por otro lado el monitoreo de Posición y Fuerza en la barra pulida proporciona la carta dinográfica que es una herramienta esencial para el análisis del comportamiento del fondo de pozo.

En el desarrollo del Seminario se efectuó un estudio de las variables de superficie para un Sistema de Bombeo convencional, teniendo en cuenta las tecnologías para la medición de estas variables, los diagnósticos que se realizan en base a éstas y la instrumentación necesaria para tener un sistema de supervisión de la unidad de Bombeo y del fondo del pozo.

En la última sesión se propone el uso de ciertos instrumentos teniendo en cuenta las ventajas de las tecnologías estudiadas y la instrumentación ofrecida en el mercado por los proveedores especializados, teniendo en cuenta detalles como el costo, las consideraciones de montaje o instalación y la configuración del cableado y del sistema de monitoreo, exponiendo la mejor opción de acuerdo a las condiciones presentes en la Unidad del pozo 33 existente en Campo Colorado.

Las sesiones del seminario se realizarán con el protocolo establecido para presentar toda la investigación hecha de las variables de Superficie. La información de las sesiones se agrupa en diez artículos con el fin de facilitar el resumen de la investigación teniendo en cuenta la relación que existe entre los temas de las sesiones.

Estos artículos servirán de base para una mejor comprensión de los temas tratados por parte de la comunidad educativa de la Universidad Industrial de Santander y de Campo Escuela Colorado, además del desarrollo y continuidad de la investigación de nuevos proyectos afines.

## 1. VIBRACIÓN

La vibración, como variable de superficie, representa la “salud” de la unidad, porque con esta se puede saber en qué condición se encuentra cada pieza de la maquinaria. Por medio de esta variable se obtiene una gran cantidad de información, la cual requiere un análisis exhaustivo para obtener datos referentes a la detección de fallas, desgastes y mantenimiento predictivo. Estos claramente son los objetivos al instrumentar la unidad en cuanto a la vibración [16].

Los costos por mantenimiento y reparaciones son elevados, porque las piezas a su tiempo empiezan a fallar, y puede haber daños catastróficos tales como ruptura del Pin, desgaste y rotura de los dientes de los engranes, desalineamiento de los ejes y daño severo en los rodamientos. Lo nombrado anteriormente son los casos que se presentan comúnmente en los pozos de CEC, y cada uno de ellos se puede prevenir si se monitorea las vibraciones de las unidad, o de cada pieza específicamente [17].

### 1.1. INSTRUMENTOS

Existen tres tipos de instrumentos que pueden ser instalados en las piezas, los cuales son: sonda de proximidad, acelerómetro, el dispositivo propuesto en [17], y el uso de un switch de vibración. Cada uno de ellos posee características únicas que atacan problemas específicos, de acuerdo a su tecnología [14], como se expone en la Tabla 1.

#### 1.1.1. Sonda de proximidad

La sonda de proximidad no es viable en la unidad de bombeo convencional porque la carcasa tanto del motor como de la caja reductora no posee las adaptaciones o agujeros con rosca que requieren estos sensores, ni tampoco hay

espacio en la parte exterior para poder monitorear los ejes. Otro inconveniente que se presenta a la hora de utilizar estas sondas es la referencia cero, o el punto donde se instalan, el cual no puede ser la pieza a medir, lo que representa su instalación en soportes anclados a tierra en caso de monitorear carcasas y piezas fijas. Si la instalación de los soportes se lleva a cabo, también se debe considerar las condiciones ambientales o la protección contra la intemperie como lo especifica la norma API670 en el capítulo 5.

Tabla 1. Características de Instrumentos para medir Vibración.

Tipo de Instrumento	Características
Sonda de proximidad	Rango: 0 a 10 [KHz] Unidad: [mils/seg] Especial para piezas móviles rotativas que flotan sobre películas de aceite como los ejes. Para piezas inmóviles necesita tener un punto de referencia fijo que no sea la pieza a medir.
Acelerómetros	Rango: 10 a 10.000 [Hz] Unidad: gravedades ó [mils/seg <sup>2</sup> ] Especial para piezas fijas, dado que se puede montar sobre la pieza a medir, tales como rodamientos y carcasas. No son buenos para medir elementos que se soporten sobre películas de aceite, como cojinetes.
Dispositivo propuesto	Rango: 0 a 125 [Hz] Unidad: gravedades Recomendado para piezas fijas y medición de vibración en general, pero no es viable para medir vibración de piezas con altas componentes de frecuencia como rodamientos.
Switch de vibración	Rango: 0 a 100 / 3 a 1000 [Hz] Unidad: On/Off (Discrete) Recomendado para piezas fijas y medición de vibración en general, por ejemplo de toda la unidad.

### 1.1.2. Acelerómetro

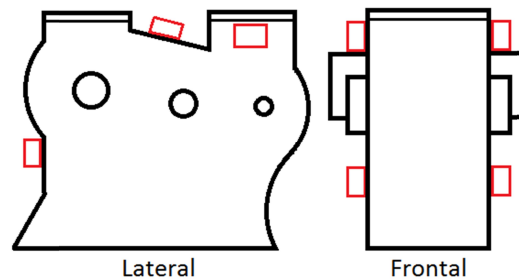
El acelerómetro es factible y se propone su empleo. Su viabilidad se debe en parte a que permite su instalación en piezas fijas y se puede montar sobre la carcasa de la caja reductora (Figura 1). El monitoreo directo de los rodamientos de la caja reductora no es viable, ya que no existe un punto lo suficientemente cercano a las piezas que cumpla con las especificaciones de la API 670. El monitoreo de la vibración de los ejes montados sobre cojinetes no es recomendable porque estos poseen una película de aceite que absorbe o amortigua las vibraciones del eje. Observando todo el sistema se aprecia que lo más aconsejable es instalar un acelerómetro que mida las vibraciones de toda la máquina. La superficie donde se realice la instalación debe estar previamente acondicionada según la norma API670, cuyo punto sea estratégico para captar las vibraciones tanto de los ejes como de los rodamientos y engranes. Este punto de medición óptima se debe obtener por medio de un estudio previo de la propagación de las vibraciones en la máquina, haciendo uso de un analizador de vibraciones portátil.

De igual forma ocurre con el motor eléctrico, el cual necesita una adaptación en la carcasa para que el montaje del acelerómetro cumpla con las especificaciones de la API670. Los rodamientos de éste no son viables para monitorear porque la forma de la carcasa no permite una fácil adecuación.

En otras partes como lo es el brazo de Pitman, el Pin y la viga viajera no es viable la instalación de un acelerómetro por dos grandes razones, las piezas son móviles y el cableado se hace imposible, y en caso de instalarlo, el acelerómetro no mediría eficazmente otras piezas de la unidad, como los ejes, rodamientos y engranes.

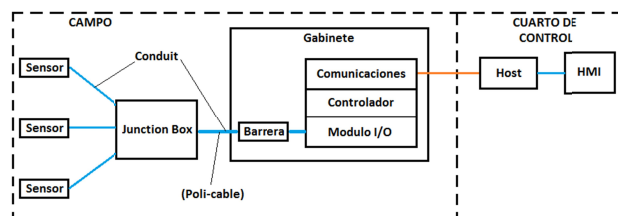
Dentro de los acelerómetros planteados en el Anexo B del artículo [11] se plantea el uso del modelo ED 793 de la marca Meggitt, el cual cumple con la mayoría de las especificaciones exigidas por la norma API670, excepto el rango de frecuencias de medición que va de 1,5 a 5000 [Hz]. Este acelerómetro tiene un costo de \$1'706.000.00 pesos (sin IVA). La norma API670 en las secciones 5.5 y 5.6, especifica la forma en que se debe realizar el cableado, teniendo en cuenta el tipo de poli-cable, las tuberías, la caja de empalmes y la puesta a tierra (Figura 2). Estas últimas consideraciones son muy importantes, porque de eso depende la vida útil de los cables y dispositivos, como también la seguridad de las instalaciones y la integridad de las señales a transmitir. El monitoreo de las vibraciones se podría realizar de forma periódica para cada Unidad, llevando un registro de los datos obtenidos de cada una de ellas con el fin de estudiar la evolución de los posibles fallos.

Figura 1. Posibles ubicaciones tanto del dispositivo como del acelerómetro (Contorno rojo).



Fuente: Autores.

Figura 2. Esquema físico de un sistema de Monitoreo.



Fuente: Autores.

### 1.1.3. Dispositivo propuesto

El dispositivo propuesto en el artículo [17] es viable de igual forma que el acelerómetro, pero con una diferencia, y es que posee una estructura característica, la cual depende de la carcasa explosión-proof en la que se instale. El dispositivo dentro de la carcasa debe montarse de manera rígida en la unidad, ya sea en la superficie de la carcasa de la caja reductora, en el Pin, o en el brazo de Pitman, por medio de tornillos o correas de acero. Este dispositivo se puede instalar en los elementos nombrados gracias a su transmisión inalámbrica y alimentación por panel solar, que elimina el problema del cableado en partes móviles (Figura 2).

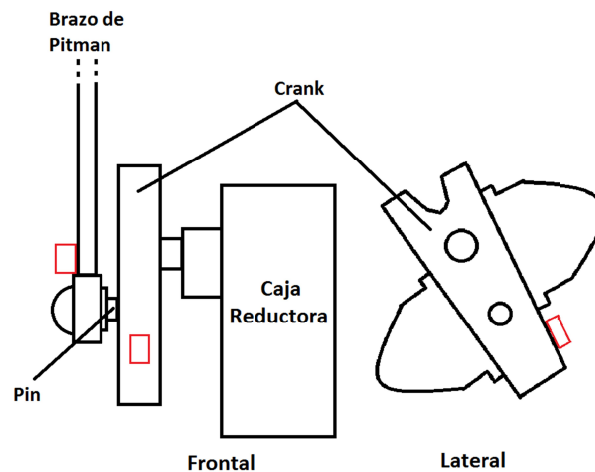
### 1.1.4. Switch de Vibración

Se propone el empleo de un Switch de vibración (Figura 4) ya que es una medida económica para la protección de toda la Unidad de Bombeo. El Switch de Vibración es configurado para que se active a un nivel de vibración específico, este switch puede ser acoplado directamente a un actuador que desenergice el motor con el fin de evitar daños mas severos en el Sistema, evitando así la intervención del personal para corregir la falla. El Swtich tambien puede ser conectado directamente al motor en serie por lo que al detectar una alta vibración el motor se apagaría. Este control de apagado es local pero se requeriría de una alarma que avisara al operador del suceso para que este realizara el diagnóstico de la unidad.

## 1.2. Monitoreo de la Vibración

La instalación y puesta en marcha de un sistema de monitoreo para la supervisión de las vibraciones de la unidad de bombeo convencional del pozo 33 de CEC se considera viable. Para la adquisición de las señales se puede optar por cualquier sistema expuesto en el anexo A del artículo [18]. En estos el procesamiento de la señal se lleva a cabo en el Host, dependiendo del software que posea el sistema de monitoreo, donde algunos permiten procesamiento avanzado y otro solo monitoreo. En caso de que solo se permita este último se puede utilizar un software secundario que extraiga los datos del sistema y haga un procesamiento independiente, pero teniendo en cuenta el tipo de señal que transmita el instrumento, de acuerdo a la Tabla 2, asegurando la compatibilidad del sistema, entre el sensor y el módulo I/O. Por otro lado se debe evaluar el retorno de la inversión de acuerdo a la producción del campo, ya que los sistemas que se encuentran en el mercado son costosos. Por lo tanto se propone implementar a futuro un desarrollo propio de software y hardware que permita el registro de datos para su posterior análisis.

Figura 3. Posibles ubicaciones móviles del dispositivo propuesto.

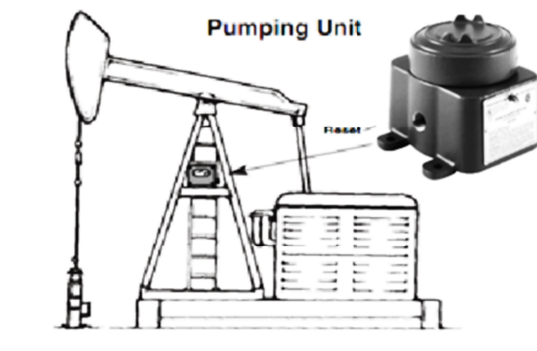


Fuente: Autores

Para el procesamiento de los datos existe una diversidad de técnicas expuestas en el artículo [19], cuyo propósito es permitir el mantenimiento predictivo de la unidad. Actualmente existe una rutina mantenimiento actualmente

se lleva a cabo de forma programada cada mes, donde aparte de revisar el aceite de lubricación, se revisan las partes mecánicas, detectando visualmente posibles desgastes o daños que requieran reparación. Con el tiempo se generan daños catastróficos, por la poca periodicidad de la supervisión y el método de diagnóstico puramente visual. Los daños lograrían disminuir si se monitoreara la unidad de forma constante y remota. Por eso la necesidad de montar el sistema de monitoreo junto con el software de análisis que pueda aplicar algún método como wavelet, Lissajous, order tracking, Fourier de alta resolución, etc.

Figura 4. Ubicación del Switch de Vibración.



Fuente: [9]

Tabla 2. Tipos de señales de salida de los sensores.

Sensor	Señal de salida
Sensor de proximidad	0 – 20 [V]
Acelerómetro	Tensión: 100 [mV/g]
Dispositivo planteado	RS-232
Switch de vibración	Contact / Discrete

## 2. MÉTODOS DE ANÁLISIS DE VIBRACIONES

Luego de obtener los datos de las vibraciones en el motor y en la caja multiplicadora que hacen parte de la Unidad de Bombeo Convencional, es necesario pensar en el método más óptimo para detectar las posibles fallas que puedan presentarse en los equipos. Todo esto con el fin de realizar un mantenimiento predictivo que disminuya costos por posibles paradas de producción o compra de repuestos costoso, y a su vez no desperdiciar tiempo de procesamiento en el empleo de técnicas que no proporcionen información relevante.

El estudio para la detección de fallas en motores [15] y en cajas multiplicadoras [11] en el dominio de la Frecuencia ha sido ampliamente investigado y existe una extensa bibliografía que suple de herramientas suficientes para realizar un mantenimiento óptimo.

Los proveedores de los instrumentos para la medición de vibraciones en la caja y en el motor, también suplen de software especializado para el análisis de vibración en el dominio de la frecuencia [10]. El software cuenta con una base de datos con variedad de fallas comunes, históricos de los datos tomados, entre otras herramientas para el análisis de las vibraciones. Por lo tanto el análisis de las fallas utilizando la transformada de Fourier es el más adecuado. No obstante, teniendo en cuenta que la carga no es constante [17] es necesario tener en cuenta el análisis de la señales tomadas utilizando la transformada de Wavelet que nos proporcionan información en tiempo y en frecuencia. El estudio de fallas utilizando Wavelet debe emplearse como un complemento a la transformada de Fourier que es la que proporciona diagnósticos más directos.

### 3. POSICIÓN Y VELOCIDAD

El monitoreo de velocidad para hallar la posición o directamente la posición, son altamente importantes ya que el comportamiento de la posición junto con la fuerza en la barra pulida logran generar la carta dinagráfica con la que es posible evaluar las condiciones del pozo.

#### 3.1. Transductor de la viga viajera (Inclinómetro)

El instrumento propuesto para medir la posición de la viga viajera de acuerdo a los nombrados en el paper de medición de esta variable [13], es el Transductor de la viga viajera (Figura 5).

Este instrumento se tuvo en cuenta por encima de los demás instrumentos mencionados debido una gran cantidad de razones. La operación de este instrumento consiste en medir el ángulo de desfase de la viga viajera con respecto a un eje horizontal, y transformar el ángulo de inclinación hallado a una salida de tensión que se interpretará como la posición. Normalmente el transductor de la viga viajera es un instrumento de instalación permanente, esta configuración permite realizar análisis a posteriori mas complejos en relación al comportamiento del pozo ya que se llevará un registro de los datos. Otra ventaja al ser permanente es la posibilidad de instalar protecciones si las señales del instrumento son llevadas a un PLC. En este equipo de control se pueden programar alarmas o cortes que desenergicen el motor en caso de que las mediciones de la Unidad se encuentren fuera del rango normal de trabajo. El transductor de la viga viajera ademas de contar con un inclinómetro incorporado para la medición de posición, mide la carga de la barra pulida, con lo que reduce la cantidad de elementos a instalar para monitorear la unidad. Al necesitar un instrumento menos, se disminuyen los costos por compras de equipos que no son necesarios, costos de mantenimiento y costos de instalación.

Los rangos de alimentación (5 - 16 [Vdc]) y la temperatura de trabajo hasta 65 [°C] son semejantes a los otros instrumentos estudiados. El rango de operación del instrumento es de +/- 45°, rango suficiente para el movimiento de la Unidad de Bombeo, y mayor que el rango de un instrumento semejante como el sensor de posición Dual. Este transductor no tiene partes móviles por lo tanto requiere poco mantenimiento y es menos probable que sufra averías, a diferencia de instrumentos como el transductor de extensión de cuerda.

Figura 5. Transductor de la viga viajera.



Fuente: [6]

De los instrumentos estudiados el transductor no cuenta con la mayor clase de exactitud. Pero la simplicidad del instrumento es alta en comparación con otras tecnologías mas complejas como las que emplean sensores de efecto Hall. Este ultimo requiere datos especificos de cada unidad, ademas de un procesamiento posterior de las señales tomadas, lo que incorpora mas etapas para el análisis de las señales y por lo tanto aumenta la cantidad de puntos donde pueden existir fallas en la toma de datos.

#### **4. CARGA**

La medición de carga de forma periódica se puede realizar con los instrumentos que ya existen en CEC, estos son una celda de carga de tipo herradura (Figura 7) y el equipo PRT (Figura 6); estos son de marca Echometer

[4][8]. Con estos dos elementos se realizan las cartas dinamométricas con ese solo instrumento, este instrumento también incluye un acelerómetro para realizar la medición de posición.

Figura 6. PRT. Transductor de Barra pulida.



Fuente Autores

En este documento se propone realizar la compra de equipos de medición permanente, para poder adquirir datos y analizarlos en cualquier instante, no solo para la terminal de monitoreo localizada en el CEC, sino también poder comunicar con una terminal remota ubicada en la sede principal de la UIS. Estos dispositivos se describen a continuación.

Figura 7. Celda de carga.



Fuente: Autores

#### 4.1. Celda de carga de medición permanente.

Estas celdas de carga se pueden instalar de manera permanente en la barra pulida, de forma que este entregando información ininterrumpida y se puede elaborar un historial de medición, y así conocer la evolución de los ciclos de bombeo, para verificar el comportamiento tanto en superficie como en fondo. El instrumento seleccionado corresponde al mostrado en la Figura 8 y se mencionan las especificaciones técnicas en la Tabla 3.

Figura 8. Celda de carga de medición permanente.



Fuente: [7]

Tabla 3. Características de la Celda de Carga.

<b>Modelos</b>	Lufkin 1923WX – 30 K
	Lufkin 1923WX – 50 K
<b>Exactitud</b>	0.5%
<b>Rango de Temperatura [°C]</b>	-18 a 65
<b>Impedancia de Entrada [<math>\Omega</math>]</b>	700 $\Omega$
<b>Voltaje de entrada [Vdc]</b>	5 – 15
<b>Salida [mV/V]</b>	2
<b>Balance a cero %</b>	1
<b>% de Sobrecarga</b>	200
<b>Número de ciclos de uso</b>	50x10 <sup>6</sup>
<b>Material</b>	Acero Inoxidable
<b>Capacidades</b>	60.000 lb
	10.000 lb

#### 4.2. Celda de carga montada en viga viajera

Otro de los instrumentos que se puede utilizar en la medición de carga permanente, en una ubicación distinta a la barra pulida, es el BMLC (por sus siglas en inglés *Beam Mounted Load Cell*), el cual posee la ventaja de localización aislada, por lo que es posible manejar el cableado retirado de partes móviles de la unidad. El instrumento mencionado puede ir soldado, o amarrado con pernos a la viga viajera (ubicado delante del rodamiento de centro). Este dispositivo se ve en la Figura 5, y las características técnicas se definen en la Tabla 4.

Tabla 4. Características de la Celda de Carga Montada en Viga.

Fuente: [12]

<b>Modelo</b>	Lufkin 101TL
<b>Estructura de Circuito</b>	Puente de Wheatstone
<b>Grosor de Sección</b>	0.030 [in]
<b>Impedancia de Entrada</b>	350 $\Omega$ / 263 $\Omega$
<b>Alimentación</b>	5 a 10 [Vdc]
<b>Offset</b>	0.32 a 32 [mVdc]
<b>Sensibilidad</b>	2 [mV/V]
<b>Instalación</b>	Requiere calibración en Campo

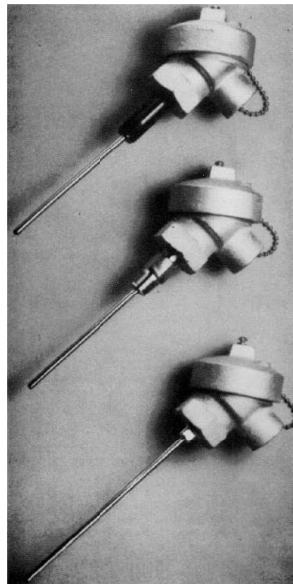
### 5. MEDICIÓN DE PAR O TORQUE

Se encontró que no es factible realizar una medición de esta variable, debido a los altos picos de par que se presentan tanto a la entrada como a la salida de la caja reductora, además no se encontró un instrumento con las características técnicas que se requieren para la unidad en el mercado, por lo tanto, se mantiene vigente la medición de forma indirecta [2], para realizar el balanceo de la unidad cuando sea requerido.

## 6. TEMPERATURA

La medición de temperatura es un indicador apropiado para la revisión del comportamiento, tanto del motor como en la caja reductora. Esta variable se especifica en la API670, para supervisar la temperatura en los devanados del motor, en los rodamientos, y en las cajas reductoras. En estas últimas para la temperatura que hay presente tanto en los bujes del eje de baja, y los rodamientos de los ejes de media y alta velocidad. Por tal razón es necesario que la medición de temperatura ayude a monitorear la óptima lubricación en los puntos de mayor rozamiento, y la óptima ventilación en los devanados del motor. Existen características que se requieren tanto para las RTD's como para las termocuplas que pueden ser instaladas en estos equipos de funcionamiento crítico [11], y en la norma API670, [1], se explica la respectiva ubicación de estos dispositivos, y su configuración de acuerdo a dimensiones, tipos de rodamiento y carcasa donde se va a ubicar.

Figura 9. Dispositivos de medición de temperatura.



Fuente:[3]

## 7. LUBRICACIÓN

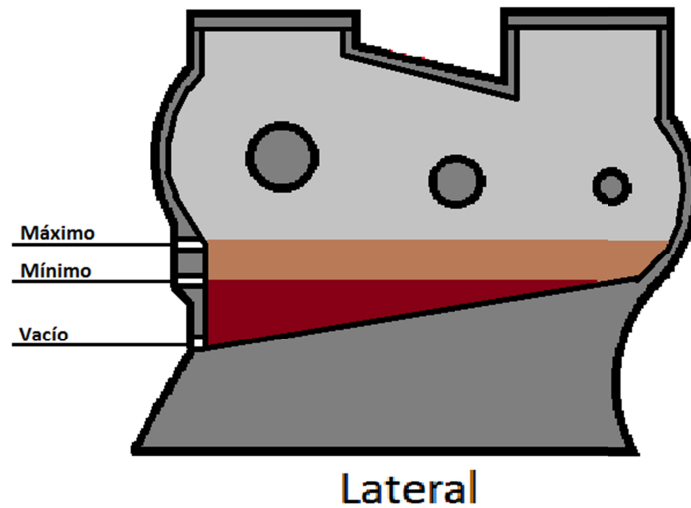
La lubricación es una variable que no permite conocer de forma directa el estado de las piezas de la unidad de bombeo, pero si no se monitorea pueden deteriorarse rápidamente los elementos que esta protege. La caja reductora de la unidad posee una piscina de aceite, y un sistema de lubricación por canaletas y espátulas [17], sobre el cual se puede monitorear dos variables que son: la condición del aceite y el nivel de la piscina. El objetivo de la medición es impedir que la caja trabaje con un aceite que ha perdido sus propiedades o con una piscina que ha bajado su nivel a tal punto que impida el correcto flujo de lubricante por las piezas. Estos dos casos son los que pueden llegar a generar daños en las partes de la unidad, acelerando el desgaste por fricción de los rodamientos, cojinetes y dientes de los engranes. La pérdida de las propiedades del aceite se refleja en la emulsión de este, debido a la presencia de agua (condensado), y también en la presencia de viruta, residuos metálicos u óxidos, que puede representar una falla en alguna pieza. El cambio del aceite se lleva a cabo cada mes, o cada vez que la inspección manual por parte del operario lo diga, siendo periódica la visita al campo, donde se determina el estado del aceite y si es necesario se vacía la piscina y se procede a reemplazarlo.

### 7.1. Instrumentos

La caja reductora posee tres agujeros en la piscina de aceite, uno en el fondo para permitir la evacuación, y dos superiores para permitir la medición del nivel. Este nivel se verifica observando que el aceite no se encuentre ni por encima del agujero superior, ni por debajo del agujero inferior. La medición crítica es la del nivel inferior, ya que si cae por debajo de este, la eficiencia de la lubricación disminuye porque el engrane de baja velocidad no alcanza a hacer suficiente contacto con la piscina, y el transporte de aceite por salpicadura y canaletas empieza a fallar. En cuanto a la medición de la condición general, esta se puede

llevar a cabo dentro de la caja, posicionando el sensor en el interior de la piscina de aceite, teniendo en cuenta que la ubicación debe permitir que circule el aceite de forma equilibrada para que la medición sea verdadera. Por este motivo no se debe instalar el sensor de condición del aceite en el fondo de la caja, porque ahí es donde se acumulan todos los residuos y no se estaría verificando el aceite que circula por la caja sino el que está estancado en el fondo.

Figura 10. Piscina de aceite de la caja reductora.



Fuente: Autores.

## 7.2. Sensor de Nivel

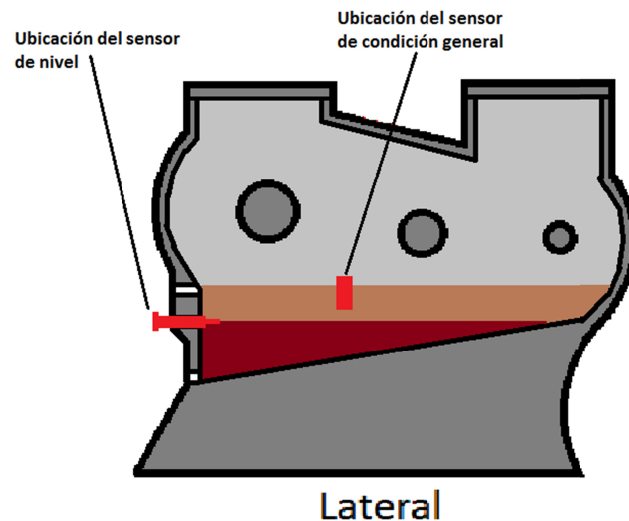
El sensor de nivel debe instalarse en el agujero de nivel bajo de aceite, como se observa en la figura. Esto asegura el disparo de la alarma cuando el instrumento detecte la falta de aceite en ese punto. El aceite usado en campo escuela colorado es un aceite que con el tiempo se vuelve espumoso y opaco, por este motivo se recomienda el uso de un diapasón vibratorio, que puede ser el Rosemount 2110, mostrado en el anexo A del artículo [17], cuya ventaja principal es su operación con fluidos aceitosos, espumosos y opacos. Para su

implementación en la caja multiplicadora del pozo 33 de Campo escuela sería necesario realizar una adecuación ampliando el orificio del visor para la instalación del instrumento.

### 7.3. Sensor de Condición General

Para el sensor de condición general se plantea el uso del KittiwakeFG-K16203-KW, que posee comunicación RS-232 y 4-20[mA]. Este sensor envía una señal donde indica en porcentaje la calidad del aceite presente, donde 0% es un estado muy pobre y 100% es estado óptimo.

Figura 11. Ubicación de los sensores de lubricación.



Fuente: Autores

### 7.4. Monitoreo de la Lubricación

La conexión del sensor de nivel y de condición general al sistema de monitoreo se considera recomendable, porque ahorraría los costos de visitar el campo continuamente para verificar el estado del aceite. Además se aumenta la eficiencia

del sistema, permitiendo conocer en tiempo real el estado de la lubricación en la caja reductora. Para llevar a cabo esta conexión se debe tener en cuenta el tipo de señal que transmite cada instrumento (Tabla 5), para que exista compatibilidad entre los módulos I/O y los sensores[18]. El objetivo de este monitoreo es permitir al operador ver el estado actual de la condición del aceite en porcentaje, y si el nivel de la piscina indica que requiere cambio o adición de aceite.

Tabla 5. Señales de salida de los instrumentos para lubricación.

<b>Sensor</b>	<b>Señal</b>
Kittiwake FG-K16203-KW	RS-232 4 – 20 [mA]
Rosemount 2110	Contact / Discrete

## 8. CONCLUSIONES

Se encontró que las variables esenciales a la hora de monitorear la unidad son la vibración, fuerza, posición y lubricación, las cuales sirven para identificar fallas y mantener la unidad en un óptimo estado, además de permitir a los operarios tomar decisiones acertadas a la hora de intervenir los pozos.

Para realizar la elección de los instrumentos adecuados para el monitoreo de cada una de las variables, es necesario tener en cuenta aspectos más allá del desempeño de cada uno de los instrumentos revisado. Factores importantes como la instalación, la cantidad de mantenimiento a realizar, las condiciones de Campo Escuela Colorado, el soporte de la marca proveedora y el costo de los instrumentos deben estar presentes a la hora de decidirse por un instrumento por encima de otro.

La elección adecuada de la instrumentación de superficie en un Sistema de Bombeo convencional proporciona beneficios en ahorro de costos por repuestos ya que al lograr detectar las fallas con un tiempo considerable el mantenimiento o cambio de las piezas afectadas será de menor valor. Además al detectar las fallas a tiempo se evitarán pérdidas de producción por paradas de bombeo no programadas.

Se estableció un soporte teórico en el que se identificaron las diferentes tecnologías de instrumentación aplicables en CEC, en base a esto se desarrolló una propuesta de Instrumentación de las variables que se consideraron necesarias monitorear.

## 9. RECOMENDACIONES

Con el fin de definir unas pautas para la instrumentación de los pozos de Campo Escuela Colorado y teniendo en cuenta futuros proyectos de investigación con temas afines a los tratados se realizan una serie de recomendaciones que son producto del trabajo realizado.

Se encuentra que el empleo del transductor de la viga viajera es viable ya que es un instrumento robusto, cuyo montaje se puede realizar en cualquier Unidad. Este instrumento permite la medición tanto de posición como de fuerza, por lo que no se necesitaría otro transductor adicional, disminuyendo costos y reduciendo la cantidad de puntos de falla del sistema de medición.

Ya que actualmente en CEC solo se realiza un mantenimiento correctivo para el motor y la caja reductora. Se sugiere la instalación de un sensor de vibración en cada equipo, implementando un mantenimiento predictivo y una medición continua, disminuyendo el tiempo de inactividad y mejorando la producción del pozo.

En CEC hay 45 pozos en estado de recuperación, de los cuales hay 25 activos, y se realiza una revisión diaria del estado de la lubricación de cada unidad de bombeo, por lo tanto se recomienda la instalación de instrumentos de medición de nivel y calidad del aceite, para que faciliten la supervisión sin interrupción de la producción.

Actualmente solo se posee un sistema portable de medición de carga y posición, lo que dificulta la detección de fallas a tiempo y el registro continuo del comportamiento del pozo. Debido a esto se sugiere la supervisión permanente de estas dos variables en cada uno de los pozos, y así identificar oportunamente problemas comunes en CEC.

Es recomendable la instalación de un sistema de monitoreo permanente que permita realizar un mantenimiento predictivo en toda la unidad, con lo que se disminuiría la posibilidad de que se presenten fallas que afecten la producción y se cumpliría el requerimiento que se tiene en CEC de monitorear la unidad una vez al día.

Para realizar una detección oportuna debe tenerse en cuenta el empleo de herramientas de análisis como la transformada de Fourier, siendo esta un método ampliamente estudiado para la detección de fallas en motores y en cajas multiplicadoras, y la transformada de Wavelet como complemento ya que esta proporciona más información que la primera en fenómenos de tipo transitorios.

El monitoreo de la vibración de toda la unidad es esencial, especialmente en la caja y el Pin, ya que ahí es donde se producen la mayoría de fallas. Para realizar esta supervisión se debe instalar un acelerómetro que permita medir la señal vibratoria de toda la unidad, en un punto óptimo que se halla por medio de un medidor de vibraciones portátil. Se propuso varias formas de obtener los datos y de procesarlos para que el operador los pueda observar a distancia. La instrumentación y monitoreo de las vibraciones se rigen por el estándar API670, que debe tenerse en cuenta a la hora de instalar el dispositivo, preparar la zona de montaje y el cableado hasta el sistema de control.

## REFERENCIAS

- [1] American Petroleum Institute. (2000). *Machinery Protection Systems API STANDARD 670* (fourth ed.). Washington, USA: API.
- [2] D.A.Torrado, Diaz, F., Villamizar, J. F., Buitrago, J. H., & Aguilar, L. A. (2011). SEMINARIO DE INVESTIGACIÓN: ESTUDIO DE LAS VARIABLES INVOLUCRADAS EN LOS SISTEMAS DE BOMBEO MECÁNICO PARA EL DISEÑO, CONTROL Y OPTIMIZACIÓN DE POZOS EN CAMPO COLORADO. Bucaramanga.
- [3] Daily Thermetrics. (2011). *Resistance Temperature Detectors*. Recuperado el Abril de 2012, de <http://www.insurcol.com/catalogo/DAILY%20THERMATIC/RTD%20BROCHURE.pdf>
- [4] Echometer Company. (05 de Noviembre de 2007). *5" Horseshoe Dynamometer Transducer*. Recuperado el 16 de Enero de 2011, de <http://www.echometer.com/products/transducers/ht5.html>
- [5] IFM Electronics. (2012). *IFM*. Recuperado el 2012, de IFM: <http://www.ifm.com/products/ar/ds/IG510A.htm>
- [6] LUFKIN . (01 de 01 de 2011). *LUFKIN AUTOMATION*. Recuperado el 02 de 01 de 2012, de LUFKIN AUTOMATION: <http://www.lufkinautomation.com/inclinometer1.asp>
- [7] Lufkin Automation. (2012). *Lufkin Load Cell*. Recuperado el 13 de Abril de 2012, de <http://www.lufkinautomation.com/loadcell1.asp>

- [8] McCoy, J. N., & Jennings, J. W. (2012). *A Polished Rod Transducer for Quick and Easy Dynagraphs*. Houston, Texas: University of Texas at Austin.
- [9] MURPHY. (s.f.). *fwmurphy*. Obtenido de [www.fwmurphy.com](http://www.fwmurphy.com)
- [10] SKF. (2012). *SKF*. Recuperado el 02 de 03 de 2012, de SKF: <http://www.skf.com/portal/skf/home/products?contentId=598280>
- [11] Velasquez, A., Velasquez, A., & Sánchez, D. (2012). Detección y Análisis de Fallas de Caja Reductora en el Sistema de Bombeo Mecánico Convencional. *Detección y Análisis de Fallas de Caja Reductora en el Sistema de Bombeo Mecánico Convencional*. Bucaramanga, Santander, Colombia.
- [12] Velasquez, A., Velasquez, A., & Sanchez, D. (2012). Fundamentos e instrumentación para la Medición de Carga en el Sistema de Bombeo Mecánico Convencional. Bucaramanga: UIS.
- [13] Velasquez, A., Velasquez, A., & Sanchez, D. (2012). Instrumentación de las variables de posición y velocidad en un Sistema de Bombeo Convencional.
- [14] Velasquez, A., Velasquez, A., & Sánchez, D. (2012). *Tecnologías de medición de Vibraciones*. Bucaramanga.
- [15] Velásquez, A., Velásquez, C., & Sánchez, D. (2012). Detección y predicción de fallas en motores eléctricos de inducción en unidades de bombeo convencional. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander.
- [16] Velásquez, A., Velásquez, C., & Sánchez, D. (2012). Generalidades del Sistema de Bombeo Mecánico en Superficie. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander.

- [17] Velásquez, A., Velásquez, C., & Sánchez, D. (2012). Lubricación De Una Unidad De Bombeo Convencional y Análisis del Pin Por Medio De Un Dispositivo. Universidad Industrial de Santander.
- [18] Velásquez, A., Velásquez, C., & Sánchez, D. (2012). Sistemas de Monitoreo de las Variables de Superficie Adquiridas en una Unidad de Bombeo Convencional. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander.
- [19] Velásquez, C., Sánchez, D., & Velásquez, A. (2012). Herramientas de análisis para señales de vibraciones. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander.

## BIBLIOGRAFÍA

American Petroleum Institute. (2000). *Machinery Protection Systems API STANDARD 670* (fourth ed.). Washington, USA: API.

D.A.Torrado, Diaz, F., Villamizar, J. F., Buitrago, J. H., & Aguilar, L. A. (2011). SEMINARIO DE INVESTIGACIÓN: ESTUDIO DE LAS VARIABLES INVOLUCRADAS EN LOS SISTEMAS DE BOMBEO MECÁNICO PARA EL DISEÑO, CONTROL Y OPTIMIZACIÓN DE POZOS EN CAMPO COLORADO. Bucaramanga.

Daily Thermetrics. (2011). *Resistance Temperature Detectors*. Recuperado el Abril de 2012, de <http://www.insurcol.com/catalogo/DAILY%20THERMATIC/RTD%20BROCHURE.pdf>

Echometer Company. (05 de Noviembre de 2007). *5" Horseshoe Dynamometer Transducer*. Recuperado el 16 de Enero de 2011, de <http://www.echometer.com/products/transducers/ht5.html>

IFM Electronics. (2012). *IFM*. Recuperado el 2012, de IFM: <http://www.ifm.com/products/ar/ds/IG510A.htm>

LUFKIN . (01 de 01 de 2011). *LUFKIN AUTOMATION*. Recuperado el 02 de 01 de 2012, de LUFKIN AUTOMATION: <http://www.lufkinautomation.com/inclinometer1.asp>

Lufkin Automation. (2012). *Lufkin Load Cell*. Recuperado el 13 de Abril de 2012, de <http://www.lufkinautomation.com/loadcell1.asp>

McCoy, J. N., & Jennings, J. W. (2012). *A Polished Rod Transducer for Quick and Easy Dynagraphs*. Houston, Texas: University of Texas at Austin.

MURPHY. (s.f.). *fwmurphy*. Obtenido de [www.fwmurphy.com](http://www.fwmurphy.com)

SKF. (2012). SKF. Recuperado el 02 de 03 de 2012, de SKF: <http://www.skf.com/portal/skf/home/products?contentId=598280>

Velasquez, A., Velasquez, A., & Sánchez, D. (2012). Detección y Análisis de Fallas de Caja Reductora en el Sistema de Bombeo Mecánico Convencional. *Detección y Análisis de Fallas de Caja Reductora en el Sistema de Bombeo Mecánico Convencional*. Bucaramanga, Santander, Colombia.

Velasquez, A., Velasquez, A., & Sanchez, D. (2012). Fundamentos e instrumentación para la Medición de Carga en el Sistema de Bombeo Mecánico Convencional. Bucaramanga: UIS.

Velasquez, A., Velasquez, A., & Sanchez, D. (2012). Instrumentación de las variables de posición y velocidad en un Sistema de Bombeo Convencional.

Velasquez, A., Velasquez, A., & Sánchez, D. (2012). *Tecnologías de medición de Vibraciones*. Bucaramanga.

Velásquez, A., Velásquez, C., & Sánchez, D. (2012). Detección y predicción de fallas en motores eléctricos de inducción en unidades de bombeo convencional. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander.

Velásquez, A., Velásquez, C., & Sánchez, D. (2012). Generalidades del Sistema de Bombeo Mecánico en Superficie. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander.

Velásquez, A., Velásquez, C., & Sánchez, D. (2012). Lubricación De Una Unidad De Bombeo Convencional y Análisis del Pin Por Medio De Un Dispositivo. Universidad Industrial de Santander.

Velásquez, A., Velásquez, C., & Sánchez, D. (2012). Sistemas de Monitoreo de las Variables de Superficie Adquiridas en una Unidad de Bombeo Convencional. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander.

Velásquez, C., Sánchez, D., & Velásquez, A. (2012). Herramientas de análisis para señales de vibraciones. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander.