

el sistema BES, ya sea por cambios en la frecuencia, apertura del choque, presión de fondo, composición del fluido, entre otros.

5 DESCRIPCIÓN GENERAL DE LA INVENCION

La presente invención presenta un método y sistema embebido Internet de las cosas (IoT - Internet of Things) de cómputo dedicado para la medición virtual en tiempo real del flujo de producción, corte de agua, cabeza de la bomba y eficiencia energética del pozo productor en pozos productores de hidrocarburos con sistema de levantamiento artificial (SLA) mediante bombeo electro-sumergible (BES), que se conecta con equipos, sensores e instrumentación del sistema de levantamiento artificial de uno o varios pozos productores, transmite y presenta los resultados en gráficos de operación en una pantalla local y en la nube computacional.

El sistema embebido Internet de las cosas - IoT de medición virtual en tiempo real se presenta en la figura 1. Uno de los componentes principales del sistema corresponde al dispositivo (17) de adquisición de señales, repositorio en base de datos en tiempo real, procesamiento, calculo, transmisión y presentación de resultados para la medición virtual en tiempo real, el cual está conformado por cinco módulos interconectados, que son: módulo internet de las cosas - IoT encargado de la gestión, transmisión y recepción de datos interna y externa del sistema de medición virtual en tiempo real y del pozo productor, módulo de procesamiento encargado de efectuar las tareas de cómputo y procesamiento dedicado para el cálculo del flujo, corte de agua, cabeza de la bomba y eficiencia energética del pozo productor, módulo de entradas y salidas analógicas y digitales I/O (módulo I/O) encargado de realizar la lectura y escritura de señales eléctricas con instrumentación del campo de producción, módulo de potencia encargado del suministro, regulación y protecciones de la energía eléctrica que alimenta los módulos del sistema de medición virtual en tiempo real y módulo de interfaz hombre-máquina - HMI encargado de presentar y recibir comandos del usuario y presentar resultados del sistema.

La presente invención se conforma e integra los modelos y algoritmos matemáticos que representan cada uno de los equipos principales de subsuelo (motor, separador de gas, bomba y tubería de producción), modelo de transferencia de calor del motor-fluido, modelo de eficiencia energética del pozo y el modelo de comportamiento del fluido, y los algoritmos de solución e interacción entre estos modelos. Usando como entradas los valores de las variables en línea proveniente de los sensores e instrumentación asociada al sistema de levantamiento artificial del pozo productor. El método realiza la medición virtual simultánea y en tiempo real del flujo, corte de agua, cabeza de la bomba y eficiencia energética de uno o varios pozos productores en simultáneo. Además el método tiene en cuenta fenómenos que influyen sensiblemente en el flujo desarrollado por el completamiento BES

en pro de mejorar la certidumbre de la medición virtual obtenida. Estos fenómenos son, el deslizamiento en el motor, la cantidad de gas del fluido que entra a la bomba, en caso de presentarse equipos separadores de gas en el equipo de levantamiento artificial y la corrección del desempeño etapa por etapa de la bomba por degradación debido a la presencia de gas libre y fluidos de alta viscosidad.

En particular el fenómeno de deslizamiento en el motor (diferencia entre la velocidad de giro del campo magnético del estator y la velocidad mecánica de giro del rotor) genera cambios relativamente pequeños en la velocidad mecánica de giro de la bomba que pueden conducir a variaciones sensibles del flujo desarrollado.

El sistema y método objeto de la presente invención realiza la medición virtual simultánea y en tiempo real del flujo de producción, corte de agua, cabeza de la bomba y eficiencia energética del pozo productor en pozos con levantamiento artificial por bombeo electrosumergible que operan fluidos con características multifásicas. La simultaneidad de la medición virtual del flujo, corte de agua, cabeza de la bomba y eficiencia energética del pozo es posible por la interacción entre cinco modelos fundamentales del método propuesto, el modelo de bomba que determina el flujo a una condición establecida de corte de agua, el modelo de tubería de producción y el modelo de transferencia de calor del motor-fluido que determinan el corte de agua a una condición establecida de flujo, el modelo eléctrico del motor que entrega la velocidad real de giro de la bomba, el modelo del fluido y el modelo de eficiencia energética.

El método vincula por medio del deslizamiento, el modelo eléctrico de motor con los modelos de los equipos hidráulicos (separador de gas, bomba y tubería de producción) y el modelo de fluido. El modelo de motor recibe como variables de entrada mediciones eléctricas suministradas por el VSD como son Voltaje (en las tres fases), Corriente (en las tres fases) y Frecuencia Eléctrica (Hz). Los modelos hidráulicos y del fluido reciben como variables de entrada las mediciones de presión y temperatura suministradas por la instrumentación ubicada en puntos específicos de un pozo con BES, como son Presión de Succión y Descarga de la Bomba, Presión de cabeza, Temperatura del Motor, Temperatura de Fondo y Temperatura de Cabeza.

Los valores de las variables de presión y temperatura del fluido son producto del desempeño hidráulico (simulado por los modelos de los equipos hidráulicos), el comportamiento y composición del fluido (simulado por el modelo de fluido) y la velocidad mecánica de giro (simulada por el modelo de motor). A su vez, los valores de las variables eléctricas son producto de la carga exigida por los equipos hidráulicos y el desempeño eléctrico (simulado por el modelo de motor), para lograr la frecuencia requerida de operación del motor. Sin embargo, variaciones de flujo o corte del agua del pozo, manifestadas en variaciones de las variables de presión y temperatura del fluido, no

necesariamente son manifestadas en variaciones de las variables eléctricas. Por lo anterior, el método involucra tanto las variables de presión y temperatura del motor y del fluido como la variables eléctricas, mejorando su sensibilidad a la medición en cambios de flujo o corte de agua y manifestados en la variación de cualquier variable del sistema.

5

El sistema de medición virtual cuenta con una interfaz Hombre-Máquina para la visualización en tiempo real del flujo de producción inferido, corte de agua, cabeza de la bomba y la eficiencia energética del pozo productor. La interfaz Hombre-Máquina permite el monitoreo en sitio y en la nube para la identificación de tendencias, anomalías y eventos

10

ocurridos durante la operación de los pozos productores monitoreados.

El sistema de medición virtual en tiempo real permite la programación de alarmas, accionamiento de interruptores, generación de comandos de disparo digital y lectura de sensores digitales a través de puertos de entrada/salida. El sistema de medición virtual en

15

DESCRIPCIÓN DE LAS FIGURAS

20

Figura 1. Diagrama general del sistema embebido internet de las cosas IoT de medición virtual en tiempo real del flujo de producción, corte de agua, cabeza de la bomba y eficiencia energética del pozo productor, el completamiento de un pozo con equipo de levantamiento artificial por bombeo electro-sumergible, y los componentes que intervienen en el proceso.

25

Figura 2. Diagrama general de los módulos que conforman el dispositivo de adquisición de señales, procesamiento, cálculo, transmisión y presentación de resultados para la medición virtual en tiempo real del flujo de producción, corte de agua, cabeza de la bomba y eficiencia energética del pozo productor en pozos productores de petróleo con sistema de levantamiento artificial por bombeo electro-sumergible.

30

Figura 3. Diagrama de flujo del algoritmo del método de medición virtual de flujo de producción, corte de agua, cabeza de la bomba y eficiencia energética del pozo productor, implementado en el dispositivo sistema embebido IoT (Internet of Things).

35

Figura 4. Diagrama de flujo del algoritmo para el cálculo del modelo matemático del motor para el balance de pérdidas eléctricas por transformación y transporte en el variador de velocidad VSD (01), transformador, cable y motor (10) por medio de un modelo equivalente por fase eléctrica.

40

Figura 5. Diagrama de flujo del algoritmo para el cálculo del modelo matemático del separador de gas para el balance volumétrico y de energía mecánica dentro del separador.

Figura 6. Diagrama de flujo del algoritmo para el cálculo del modelo matemático de la bomba que soluciona iterativamente el flujo que justifica la cabeza de presión total desarrollada por la bomba (presión de descarga de la bomba PD – presión de entrada a la bomba PI) medida a un corte de agua determinado.

Figura 7. Diagrama de flujo del algoritmo para el cálculo del modelo matemático de tubería para la estimación iterativa del corte de agua que justifica la caída de presión total (Presión de descarga de la bomba PD – Presión de cabeza de pozo THP) medida a un flujo determinado (F), teniendo en cuenta los cambios de las condiciones en secciones finitas mediante un balance de pérdidas de presión.

Figura 8. Diagrama de flujo del algoritmo para el cálculo del modelo de medición virtual en tiempo real de la eficiencia energética para los pozos con sistema de levantamiento artificial BES expresado en términos del consumo de kWD por barril de producción por 1000 ft de levantamiento vertical.

DESCRIPCIÓN DETALLADA DE LA INVENCION

La invención tecnológica sistema embebido IoT para la medición virtual en tiempo real del flujo de producción, corte de agua, cabeza de la bomba y eficiencia energética del pozo productor para pozos productores de hidrocarburo con sistema de levantamiento artificial con bombeo electro-sumergible comprende en su sistema, los equipos, sensores, instrumentos y dispositivos de la figura 1. El dispositivo (17) presentado en la figura 2, corresponde al elemento principal del sistema de la presente invención, que realiza la adquisición de señales, repositorio en base de datos en tiempo real, procesamiento, cálculo, transmisión y presentación de resultados para la medición virtual en tiempo real de las tendencias, estados y cambios del flujo de producción (F), corte de agua (WC), cabeza de la bomba (H) y la eficiencia energética (EFE) del pozo productor. La invención permite realizar la medición virtual en tiempo real para uno o varios pozos productores de petróleo en simultáneo, a partir de la adquisición de señales, repositorio en base de datos en tiempo real y procesamiento en sitio de mediciones provenientes de los sensores e instrumentos instalados en los equipos de subsuelo, la instrumentación de superficie y el variador de velocidad (VSD) del sistema de levantamiento artificial de cada pozo. La instrumentación para los equipos de subsuelo comprende: presión de succión (PI) (11), presión de descarga (PD) (07), temperatura de succión (TI) (11) y temperatura del motor (TM) (11). La

instrumentación para los equipos de superficie comprende: presión de cabeza (THP) (06) y temperatura de cabeza (WHT) (06). La instrumentación para el variador de velocidad comprende: corriente (I) (02), voltaje (V) (03), frecuencia (ω_e) (04) y factor de potencia (FP) (05). Asimismo, el sistema embebido IoT realiza la adquisición de señales, repositorio en base de datos en tiempo real y procesamiento de datos provenientes de la instrumentación de inyección de diluyente en fondo de pozo (FN) (15).

Esta invención presenta un sistema para la medición virtual simultánea en tiempo real del flujo de producción, corte de agua, cabeza de la bomba y eficiencia energética en pozos con levantamiento artificial por bombeo electro-sumergible (BES), que comprende los siguientes elementos: un motor electro-sumergible (10), un separador de gas (09), una bomba electro sumergible (08), una tubería de producción (12), un variador de velocidad (01) con sensores de corriente (02), voltaje (03), frecuencia eléctrica (04), factor de potencia (05), un sensor de fondo (11), un sensor de superficie (06), un instrumento inyección de diluyente (15), un protocolo y medio de comunicaciones entre el dispositivo de adquisición, de señales, procesamiento, cálculo y presentación de resultados para la medición virtual en tiempo real y los instrumentos del pozo (16), un dispositivo (17) para adquisición de señales, repositorio en base de datos en tiempo real, procesamiento, cálculo, transmisión y presentación de resultados para la medición virtual en tiempo real del flujo de producción, corte de agua, cabeza de la bomba y eficiencia energética, el cual, se compone de un módulo de internet de las cosas - IoT (18), un módulo de procesamiento (19), un módulo de entradas y salidas analógicas y digitales - I/O (20), un módulo de potencia (21) y un módulo de Interfaz Hombre-Máquina - HMI (24), así también integra un periférico para comunicación GSM (22) y una aplicación en la nube para visualización remota de la medición virtual (23).

En la presente invención tecnológica, las mediciones de variables de operación provenientes de los sensores e instrumentación instalada en cada pozo productor, son consultadas y adquiridas por el dispositivo (17) para adquisición de señales, repositorio en base de datos en tiempo real, procesamiento, cálculo, transmisión y presentación de resultados de la medición virtual en tiempo real mediante un protocolo de comunicación industrial para conexión directa con los sensores e instrumentos del pozo a través de un nodo central de comunicación (16).

La arquitectura del dispositivo (17) para adquisición de señales, repositorio en base de datos en tiempo real, procesamiento, cálculo, transmisión y presentación de resultados para la medición virtual en tiempo real, consiste de un diseño modular que comprende cinco módulos interconectados: módulo internet de las cosas - IoT (18) encargado de coordinar las sub-tareas para la medición virtual en tiempo real del flujo, corte de agua, cabeza de la bomba y la eficiencia energética del pozo, módulo de procesamiento (19) encargado de efectuar las tareas de cómputo y procesamiento mediante procesador de cómputo dedicado

para la medición virtual en tiempo real del flujo, corte de agua, cabeza de la bomba y la eficiencia energética del pozo, módulo de entradas y salidas - I/O (20) encargado de realizar la comunicación con diversos dispositivos e instrumentos externos de conexión del pozo a través de puertos de entradas y salidas del dispositivo, módulo de potencia (21) encargado del suministro, regulación y protección de la energía eléctrica a los módulos del dispositivo (17) y módulo interfaz de usuario hombre-máquina (HMI) (24) del dispositivo (17) para la medición virtual simultánea en tiempo real, encargado de realizar la presentación y visualización de los resultados obtenidos por la ejecución del método de medición virtual en tiempo real. El módulo interfaz de usuario hombre-máquina (HMI) (24) permite realizar configuración en sitio, carga y/o actualización de los parámetros requeridos para la ejecución del método de medición virtual en tiempo real. El módulo interfaz de usuario hombre-máquina (HMI) (24) permite monitorear las variaciones y tendencias en tiempo real del flujo de producción, corte de agua, cabeza de la bomba y eficiencia energética del pozo productor, en pozos con levantamiento artificial por bombeo electro-sumergible (BES).

Cada uno de los módulos está conformado por recursos computacionales dedicados para garantizar el funcionamiento en tiempo real y la comunicación entre módulos.

El dispositivo para adquisición de señales, procesamiento, cálculo y presentación de resultados para medición virtual en tiempo real (17) del flujo, corte de agua, cabeza de la bomba y eficiencia energética en pozos productores incluye una interfaz HMI (24) para visualización y monitoreo en tiempo real de tendencias, eventos y detección de atípicos del flujo de producción, corte de agua, cabeza de la bomba y la eficiencia energética del pozo.

El módulo de internet de las cosas - IoT integra un periférico de comunicación GSM (22) para transmisión de datos hacia la nube (23), en donde se almacenan y visualizan los valores de flujo de producción, corte de agua, cabeza de la bomba y eficiencia energética del pozo, que corresponde al resultado de la medición virtual en tiempo real mediante protocolos de comunicación de Internet de las cosas.

El sistema embebido IoT para la medición virtual en tiempo real del flujo de producción, corte de agua, cabeza de la bomba y eficiencia energética en pozos productores de petróleo presenta las siguientes características funcionales:

- ❖ Procesadores dedicados de alto rendimiento para el cálculo computacional en sitio (Edge Computing) y en tiempo real del flujo de producción, corte de agua, cabeza de la bomba y eficiencia energética del pozo productor.
- ❖ Interfaz HMI para la visualización de resultados e interacción del usuario con el equipo.
- ❖ Soporte de comunicaciones industriales para conectividad con sensores e instrumentos instalados en el sistema de levantamiento artificial del pozo petrolero.

- ❖ El dispositivo incluye en su arquitectura, puntos de conexión para puertos de entrada y salida, para la interacción con instrumentación y actuadores de tipo analógicos y digitales que soporten el estándar industrial de 4-20 mA.
 - ❖ Repositorio conformado por una base de datos en tiempo real, que almacena los datos a una alta frecuencia provenientes de los sensores e instrumentación de uno o varios pozos petroleros con sistema de levantamiento artificial por bombeo electrosumergible y los resultados que calcula y presenta el dispositivo (17) que corresponden al valor instantáneo, tendencias, cambios, promedios y estadísticos de: La medición virtual en tiempo real del flujo de producción, corte de agua, cabeza de la bomba y eficiencia energética de uno o varios pozos.
 - ❖ El dispositivo permite realizar la transmisión de datos hacia la nube para el repositorio en base de datos en tiempo real y visualización de la información. El dispositivo cuenta con una aplicación interfaz software para la visualización de los resultados de la medición virtual en tiempo real almacenados en la nube.
 - ❖ El dispositivo presenta un diseño modular, el cual, permite ajustar la solución al ambiente de operación del pozo.
 - ❖ El encapsulado del dispositivo es compatible con los estándares de dispositivos industriales.
- La implementación en hardware del dispositivo (17) para la adquisición de señales, repositorio en base de datos en tiempo real, procesamiento, cálculo, transmisión y presentación de resultados de la medición virtual en tiempo real, el cual corresponde al componente principal del sistema embebido IoT, se compone de cinco módulos independientes conectados entre sí como se ilustra en la Figura 2. A continuación se describe cada uno de los módulos que componen el dispositivo principal de la invención:
- Módulo de potencia.
 - Módulo Internet de las Cosas - IoT
 - Módulo de procesamiento
 - Módulo de entradas y salidas analógicas y digitales - I/O
 - Módulo Interfaz hombre-máquina - HMI

A. Módulo de potencia (21):

- El módulo de potencia (21) es el encargado del suministro y regulación de energía eléctrica a cada uno de los módulos, sub-módulos, procesador y componentes internos del dispositivo de medición virtual en tiempo real. El módulo de potencia está compuesto internamente por dos fuentes conmutadas de alimentación de entrada de 120-240 Vac y voltaje de salida de 24Vdc@15W y 5Vdc@50W. Éste módulo integra la opción de un fusible de protección para situaciones de sobre-corriente o cortocircuitos en el sistema. El módulo de potencia también incluye un mecanismo de apagado y reinicio externo del sistema

(RESET), compuesto por un interruptor ubicado en la parte delantera del módulo, que al ser presionado todos los módulos se apagarán inmediatamente al interrumpir el suministro de energía.

5 El módulo de potencia (21) provee el suministro y regulación de energía eléctrica a cada uno de los componentes, módulos y sub-módulos del dispositivo para la medición virtual en tiempo real del flujo de producción, corte de agua, cabeza de la bomba y eficiencia energética del pozo (17) a través del bus de comunicaciones y las borneras instaladas en la parte frontal del dispositivo (17). El módulo de potencia (21) está conformado por los
10 siguientes sub-módulos:

- Sub-módulo de alimentación dual mediante el uso de dos fuentes de DC de tecnología *conmutada*, una de 50W a 5V y otra de 15W a 24V, con capacidad de conexión a red eléctrica AC en el rango desde 80Vrms hasta 264 Vrms con un rango de frecuencia de 47Hz a 63 Hz.
- 15 • Sub-módulo de protecciones para sobre picos de corriente.
- Sub-módulo de comunicaciones para la transmisión de potencia.
- Sub-módulo de reinicio remoto con una señal del módulo IoT (18) y pulsador independiente instalado en el módulo de potencia (21).

20 **B. Módulo de Internet de las Cosas - IoT (18):**

Físicamente el módulo de internet de las cosas - IoT presenta en su parte frontal un conjunto de periféricos para la conexión y acceso a la unidad de procesamiento central (CPU) del módulo, conformado por un puerto HDMI para señal de video a una pantalla externa, un puerto microUSB para alimentación auxiliar externa del equipo, una ranura para el ingreso
25 de una tarjeta SimCard, y en su parte superior un conector para una antena GSM para comunicación con la red de telefonía celular. El módulo IoT integra además 4 puertos USB para conexión de periféricos externos (teclado, mouse, Pendrive) y un puerto de conexión Ethernet, el cual, está dispuesto para la conexión con los instrumentos de pozo en el sistema de levantamiento artificial.

30 El módulo IoT es el control maestro de todo el sistema. Su rutina de control está desarrollada para coordinar todo el proceso que involucra la medición virtual en tiempo real. Su sistema realiza las siguientes tareas:

- 35 • Establece un enlace de comunicación con los sensores e instrumentos de fondo, superficie, inyección y motor; a fin de lograr realizar la consulta y adquisición de cada una de las variables requeridas para la medición virtual. Para ello establece el protocolo de comunicación industrial de conexión Ethernet MODBUS TCP/IP, un protocolo ampliamente utilizado en equipos industriales tales como PLCs, PC,
40 drivers y otros tipos de dispositivos de instrumentación y automatización que se encuentran en la instalación del pozo.

- 5

 - Mediante el protocolo de comunicación implementado entre módulos (protocolo CAN - Controller Area Network), se establece un enlace para transmitir la trama de datos hacia el módulo encargado de procesar los datos de sensores y ejecutar los algoritmos y modelos para la medición virtual y generación de los datos de flujo de producción y eficiencia energética (módulo de procesamiento) (19). Una vez realizado el cálculo se establece la consulta y recepción de los datos resultantes.
- 10

 - Organización de la información obtenida de la medición virtual realizada para cada instante de tiempo, y almacena los datos obtenidos en un archivo histórico que contiene las mediciones efectuadas durante su operación continua.
- 15

 - Mediante la interfaz HMI, el módulo ejecuta el proceso de visualización y reporte de los datos obtenidos de la medición virtual.
 - Ejecuta la organización de los datos obtenidos de la medición virtual, y efectúa la rutina de transmisión de los mismos hacia el repositorio en base de datos en tiempo real en la nube, para su visualización desde esa plataforma. La transmisión de datos es realizada mediante la red de comunicación móvil GSM.
 - Ejecuta la rutina de lectura y escritura de cada uno de los puertos de entrada y salida en el módulo I/O (20).
- 20

El módulo de internet de las cosas - IoT (18) se basa en un sistema embebido de arquitectura ARM que gestiona el dispositivo (17) para adquisición de señales, procesamiento y cálculo de la medición virtual en tiempo real del flujo de producción, corte de agua, cabeza de la bomba y eficiencia energética del pozo, conformado por:
- 25

 - Un sub-módulo de comunicación MODBUS-TCP/IP maestro-esclavo y de comunicación mediante el protocolo OLE for Process Control - OPC con la funcionalidad de cliente y servidor, para la lectura de los registros de sensores e instrumentación de pozos petroleros y publicación de los resultados de flujo de producción, corte de agua, presión en cabeza de la bomba y eficiencia energética solicitados por dispositivos externos,
- 30

 - Un sub-módulo para la implementación del protocolo CAN (Controller Area Network) para la transferencia y recepción de información entre los módulos que conforman el sistema,
- 35

 - Un sub-módulo de comunicaciones móviles (GSM) para el envío de resultados de la medición virtual hacia la nube computacional, y
 - Un sub-módulo HMI para publicación de resultados en sitio mediante estándar internacional de video HDMI.
 - Un sub-módulo de repositorio conformado por una base de datos en tiempo real, que almacena los datos a una alta frecuencia provenientes de los sensores e instrumentación de uno o varios pozos petroleros con sistema de levantamiento artificial por bombeo electro-sumergible y los resultados que calcula y presenta el
- 40

dispositivo (17), que corresponden al valor instantáneo, tendencias, cambios, promedios y estadísticos de: La medición virtual en tiempo real del flujo de producción, corte de agua, cabeza de la bomba y eficiencia energética de uno o varios pozos.

5

C. Módulo de procesamiento (19):

10 El módulo de procesamiento en su parte frontal presenta un conjunto de periféricos para la conexión y acceso a su CPU interna, compuesto de un puerto HDMI para señal de video a una pantalla externa, y un puerto micro USB para una posible alimentación auxiliar. El módulo de procesamiento incluye además 2 puertos USB para conexión de periféricos externos (teclado, mouse, Pendrive) y un puerto de conexión Ethernet; los cuales están
15 dispuestos para acceder y configurar el equipo de forma externa.

El módulo de procesamiento es el encargado de efectuar las tareas de cómputo y procesamiento de los datos y variables que son obtenidos de los sensores e instrumentación del sistema de levantamiento artificial del pozo, realizando el cálculo y
20 obteniendo los datos de medición virtual del flujo de producción, corte de agua, cabeza de la bomba y eficiencia energética del pozo. Este módulo actúa como una unidad de procesamiento central en modo esclavo (su programación sigue las órdenes del módulo IoT) y dedicado exclusivamente a la actividad de cálculo y procesamiento.

25 El módulo de procesamiento (19) del dispositivo (17) para adquisición, procesamiento y cálculo de la medición virtual simultánea en tiempo real del flujo de producción, corte de agua, cabeza de la bomba y eficiencia energética del pozo, ejecuta los algoritmos para la medición virtual en tiempo real del flujo de producción, corte de agua, cabeza de la bomba y eficiencia energética del pozo a partir de los datos adquiridos de los sensores e
30 instrumentación del pozo petrolero con sistema de levantamiento artificial por bombeo electro-sumergible. Donde el módulo de procesamiento (19) consiste de un sistema embebido de arquitectura ARM con implementación del protocolo CAN (Controller Area Network) para la transmisión y recepción de información entre los módulos que conforman el sistema, y la ejecución del método para la medición virtual simultánea en tiempo real del
35 flujo de producción, corte de agua, cabeza de la bomba y la eficiencia energética en pozos petroleros. Se conforma de los siguientes sub-módulos:

- Sub-módulo puerto periférico de salida de video HDMI para la gestión gráfica de archivos mediante dispositivo de video externo conectado al módulo de
40 procesamiento.

- Sub-módulo de puertos periféricos de entradas y salidas USB y microUSB para la gestión de archivos y alimentación del módulo de procesamiento respectivamente.
- Sub-módulo de puerto periférico de comunicaciones Ethernet TCP/IP para la gestión de actividades de transferencia de información entre una red local de internet y el módulo de procesamiento.

D. Módulo de entradas y salidas - I/O (20):

El módulo I/O cuenta con las siguientes cantidades de puertos:

- Un puerto de salida analógica de lazo 4-20mA (24V).
- Dos puertos de entrada analógica de lazo 4-20mA (24V).
- Dos puertos digitales configurables para entrada/salida de señales (5V).
- Dos puertos de entrada para adquisición de señales analógicas de voltaje (0-5V).
- Dos puertos USB para conexión de periféricos externos (teclado, mouse, Pendrive)
- Un puerto de conexión Ethernet; dispuesto para acceso y configuración.

El módulo I/O en su parte frontal incluye los bornes de conexión para los puertos de entrada/salida, además cuenta en su parte frontal de un puerto HDMI para señal de video a una pantalla externa.

El módulo de entradas y salidas - I/O es el módulo de puertos de entradas y salidas del sistema de medición virtual en tiempo real. Es el encargado de realizar la adquisición de señales de dispositivos e instrumentos externos. Mediante este módulo es posible realizar tareas que requieran de accionar un interruptor, leer una señal de disparo, activar una alarma o corte, leer una señal de sensor adicional, o cualquier otra acción que llegue a ser requerida para la operación del pozo.

El módulo de entradas y salidas analógicas y digitales - I/O (20) del sistema de medición virtual simultánea en tiempo real del flujo de producción, corte de agua, cabeza de la bomba y eficiencia energética del pozo (17) realiza la lectura y escritura de señales en estándar 4-20mA y valores de tensión (Voltaje) en el rango 0-5V para la generación de alarmas, activación de actuadores analógicos y digitales externos. Se conforma de los siguientes sub-módulos:

- Sub-módulo de puertos periféricos de entradas y salidas USB y microUSB para la gestión de archivos y alimentación del módulo I/O de entradas / salidas.
- Sub-módulo de puerto periférico de salida de video HDMI para la gestión gráfica de archivos mediante dispositivo de video externo conectado al módulo I/O de entradas / salidas.

- Sub-módulo de puerto periférico de comunicaciones Ethernet TCP/IP para la gestión de actividades de transferencia de información entre una red local de internet y el módulo I/O de entradas / salidas.
- Sub-módulo de puertos periféricos de entradas y salidas analógicas en el estándar 4-20mA para la generación de alarmas y activación de actuadores analógicos externos.
- Sub-módulo de puerto periférico de salida analógica de corriente de lazo 4-20mA.
- Sub-módulo de puertos periféricos de entradas analógicas de tensión (voltaje) en el rango 0V – 5V para la adquisición de señales de sensores externos conectados al módulo I/O de entradas / salidas.
- Sub-módulo de puertos periféricos de entrada y salida digital de tensión en el rango 0V – 5V para la lectura de sensores digitales y activación de actuadores digitales respectivamente conectados al módulo I/O de entradas / salidas.

15 **E. Módulo Interfaz Hombre-Máquina –HMI (24):**

Un módulo interfaz de usuario hombre máquina (HMI) (24) del dispositivo (17) de adquisición de señales, repositorio en base de datos en tiempo real, procesamiento, cálculo, transmisión y presentación de resultados para la medición virtual simultánea en tiempo real del flujo de producción, corte de agua, cabeza de la bomba y eficiencia energética del pozo, encargado de realizar la visualización de los resultados obtenidos del método de medición virtual. El módulo interfaz de usuario hombre máquina (HMI) (24) permite realizar configuración en sitio, carga y/o actualización de los parámetros requeridos para la ejecución del método de medición virtual sobre el dispositivo (17). El módulo interfaz de usuario hombre máquina (HMI) (24) permite monitorear las variaciones y tendencias en tiempo real del flujo de producción, corte de agua, cabeza de la bomba y eficiencia energética en pozos con levantamiento artificial por bombeo electro-sumergible (BES). Asimismo, el módulo interfaz de usuario hombre máquina HMI (24) incluye elementos indicadores del estado de comunicación y transferencia de datos desde el sensor de fondo (SF) (07 y 11), el sensor de superficie (SS) (06), el variador de velocidad (VSD)(01) y el instrumento de inyección de diluyente en fondo (FN) (15) así como del funcionamiento del sistema de medición virtual. El módulo HMI (24) está conformado en su componente hardware por una pantalla LCD, una tarjeta de controlador de video HDMI, una tarjeta de controlador para la interfaz táctil, un marco chasis para soporte de la pantalla y controladores, un puerto de entrada de video HDMI, un puerto de salida USB para la interfaz táctil, y un puerto de alimentación de conexión al módulo de potencia (21).

Cada uno de los módulos que conforman el sistema de medición virtual en tiempo real, se comunica entre sí mediante el protocolo de comunicación CAN (Controller Area Network) de forma que ejecutan cada una de sus tareas siguiendo la jerarquía de maestro-esclavo mediante el bus de datos y alimentación (BUS COM). La jerarquía de los módulos ubica al módulo IoT como el maestro y coordinador central de toda la rutina de medición virtual que

se realiza, al tiempo que es el encargado de visualizar y transmitir la información correspondiente; enseguida se ubica el módulo de procesamiento como el módulo esclavo dedicado al procesamiento y cálculo de los datos de la medición virtual en tiempo real que se realiza; el módulo I/O se ubica como un esclavo dedicado a la lectura y escritura de variables para cada uno de sus puertos predeterminados y el módulo interfaz hombre-máquina – HMI se ubica como esclavo dedicado a la lectura y escritura de comandos e información de resultados.

Dentro de las capacidades que integra el sistema de medición virtual en tiempo real, se encuentra además la opción de establecer un enlace de comunicación para la transmisión de datos hacia la nube, mediante el uso de un sub módulo de comunicación celular (GSM) (22) y una antena de 2 dB para enlazar el dispositivo con la antena de comunicación celular más cercana; de manera que el módulo puede operar en las cuatro bandas de telefonía celular en Colombia (850/900/1800/1900 Mhz), siendo compatible con cualquier SimCard (2.5x1.5 cm) de las diferentes empresas de comunicaciones que prestan el servicio para Colombia. Cuenta con una potencia de transmisión de 2 W en las frecuencias de 850 y 900 MHz y 1 W a 1800 y 1900 MHz, soporta el envío de mensajes (SMS) punto a punto MO y MT, SMS Broadcast, además de obtener conexión a internet utilizando el protocolo embedded TCP/UDP, FTP/HTTP.

Método para la medición virtual en tiempo real del flujo.

El método desarrollado y presentado en esta invención, permite la medición virtual en tiempo real del flujo de producción, corte de agua, cabeza de la bomba y la eficiencia energética del pozo, está compuesto por seis modelos matemáticos fundamentales incluidos dentro de los algoritmos de cómputo en el dispositivo de medición virtual en tiempo real, los cuales fueron optimizados para el funcionamiento en el procesador embebido del módulo de procesamiento (19). Los modelos son los siguientes: un modelo de fluido, un modelo de motor y transferencia de calor (Figura 4), un modelo de separador de gas (Figura 5), un modelo de bomba (Figura 6), un modelo de tubería (Figura 7) y un modelo de medición virtual de eficiencia energética (Figura 8).

Para una mejor comprensión a continuación se realiza una descripción de su funcionamiento.

A. Modelo de fluido:

El modelo de fluido es de tipo Black-Oil, que proporciona el estado de las fases (aceite, agua y gas), sus propiedades individuales y mezcladas según las condiciones de estado impuestas a lo largo del sistema. Estas condiciones corresponden a la temperatura y presión medida por la instrumentación de fondo y superficie o las condiciones descritas por los modelos de la bomba y la tubería en secciones intermedias de estos equipos. Por lo tanto, permite calcular el flujo en condiciones de fondo, cima o condiciones estándar o cualquier otra condición requerida. Este modelo es construido mediante un ajuste óptimo

de la información experimental PVT (presión, volumen y temperatura) del fluido del reservorio vs diversas correlaciones y fórmulas de amplio uso en la simulación del comportamiento PVT y reglas de mezcla agua-aceite reportadas.

- 5 Este modelo recibe como entrada las condiciones del fluido, presión (P) y temperatura (T), y el corte de agua (WC). Como resultado, las salidas de este modelo son: relación entre petróleo y gas (GOR), factores volumétricos por fase (B_o para el aceite, B_a para el agua y B_g para el gas), relaciones de gas disuelto (R_{so} para el aceite y R_{sa} para el agua), densidad (ρ) y viscosidad (μ) de las fases puras del fluido y de las fases mezcladas.

10

B. Modelo de motor y transferencia de calor:

- Consiste en un balance de pérdidas eléctricas por transformación y transporte en el variador de velocidad VSD (01), transformador, cable y motor (10) por medio de un modelo equivalente por fase eléctrica. El algoritmo de solución del motor se ilustra en la Figura 4, en la cual se enumeran los pasos de la secuencia de cálculo, referidos igualmente en la descripción detallada del modelo, realizada a continuación.

- Las variables de entrada al modelo (36) son Voltaje (V), Corriente (I) y Frecuencia (ω_e) mediciones provenientes del variador, Temperatura de Cabeza (WHT) y Temperatura de Fondo (TI) mediciones provenientes de los sensores de superficie y fondo. Las variables de salida (41) son el deslizamiento (S), la velocidad mecánica de giro (ω_m), la potencia suministrada al eje de la bomba (Peje) y la potencia disipada (Pdc) por el motor.

- Inicialmente se calcula el voltaje (V_h) y la corriente de salida en el transformador (I_h), por el lado de alta tensión, utilizando la relación de transformación (N_t) (37):

$$V_h = V \cdot N_t \quad \text{(Ecuación 1)}$$

$$I_h = I / N_t \quad \text{(Ecuación 2)}$$

- Para calcular la pérdida de tensión sobre el conductor (V_c), se calcula la resistencia del conductor (R_c) teniendo en cuenta, la corrección a condiciones de temperatura media del conductor (T_{mc}), la resistencia del cable suministrada por el fabricante (R_o), su temperatura de referencia (T_o) y el coeficiente de conductividad térmica para la resistencia del cable (α) (38):

$$T_{mc} = \frac{WHT + TI}{2} \quad \text{(Ecuación 3)}$$

- $R_c = R_o \left(1 + \alpha (T_{mc} - T_o) \right)$ (Ecuación 4)

$$V_c = I_h \cdot R_c \quad \text{(Ecuación 5)}$$

La potencia disipada en el conductor (P_w) se estima con la corriente de alta (I_h) y la resistencia del conductor (R_c):

40

Con la potencia disipada (P_w) se estima el voltaje (V_m) y la corriente (I_m) a la entrada del motor (39).

5 Usando el circuito equivalente por fase referido al estator del motor, descrito por medio de la resistencia del estator (R_s), la inductancia en el estator (L_s), la inductancia de magnetización (L_m), la inductancia en el rotor (L_r) y la resistencia en el rotor (R_r), se calculan las pérdidas en el cobre del estator P_s (39).

10 Además, es necesario calcular las reactancias: inductiva en el estator (X_s), en la rama magnetizante (X_m) y en el rotor (X_r).

Por otro lado, se calculan las impedancias: en el estator (Z_s), en la rama magnetizante (Z_m), en el rotor (Z_r) y la total (Z_t).

15 La corriente en el rotor (I_r) se calcula a partir de las impedancias (Z_s , Z_r y Z_m) y el voltaje de entrada al motor (V_m).

20 Las pérdidas en el cobre del rotor (P_r), el factor de potencia (FP), la potencia activa de entrada al motor (P_{in}), la potencia entregada en el eje (P_{eje}), el deslizamiento (S) y la velocidad mecánica entregada en el eje del motor (ω_m) se determinan a partir de las variables anteriores (40).

El modelo calcula el deslizamiento en el eje del motor a partir de la lectura de las variables eléctricas suministradas por el VSD (01).

25

C. Modelo de separador de gas:

30 La cantidad de gas real que entra al sistema de bombeo es una variable muy importante para la respuesta de flujo del modelo de la bomba. Por ello, la presente invención contempla en sus algoritmos de cálculo un modelo de eficiencia de separación de gas basado en balances volumétricos y de energía mecánica dentro del separador. El algoritmo de solución del separador de gas se ilustra en la Figura 5, en la cual se enumeran los pasos de la secuencia de cálculo, referidos igualmente en la descripción detallada del modelo, realizada a continuación.

35

Las variables de entrada al modelo (42) son la temperatura de fondo (T_I), presión de fondo (P_I), la Frecuencia (ω_e), el flujo total de gas y líquido de entrada al separador, así también la curva de desempeño respectiva del inductor del separador. Las variables de salida (48) son el flujo de gas separado al anular (F_{ga}), el flujo de gas que ingresa a la bomba (F_{gb}) y 40 presión de succión de salida del separador (P_{Is}).

El modelo calcula los flujos de separación en una interface hipotética dentro de este equipo. Dichos flujos separados corresponden a una corriente de circulación interna (F_c), una corriente hacia el anular (F_a) y una corriente hacia la bomba (F_b). La cantidad de gas en cada corriente (α_{gs} para la entrada al separador, α_{gb} para la entrada bomba y α_{gc} en recirculación) depende del arrastre de burbujas del mismo, debido a las fuerzas que actúan en el sistema: velocidad de arrastre con flujo no-deslizado V_{gis} y V_{ga} , fuerzas centrífugas f_c y diferencias de densidad líquido-gas $\rho_l - \rho_g$):

El modelo resuelve mediante un balance másico en el que se supone el flujo de gas la corriente de circulación interna (F_{gc}) (44).

Posteriormente se calcula la ganancia en presión ($\Delta P_{inductor}$) generada por el inductor del separador (45) mediante el uso de la curva de inducción de este dispositivo, a partir de los flujos de gas y líquido de entrada al separador. También se calcula la caída de presión a través de los puertos de salida del separador (ΔP_{salida}) mediante la ecuación de pérdidas (46).

Finalmente se asegura que el balance de ganancia ($\Delta P_{inductor}$) y pérdida de presión (ΔP_{salida}) estén en equilibrio (47). Si no es así se suponen nuevos flujos de gas y líquido y se repite el procedimiento.

D. Modelo de bomba:

Soluciona iterativamente el flujo que justifica la cabeza de presión total desarrollada por la bomba (presión de descarga de la bomba PD – presión de entrada a la bomba PI), que es resuelta como cabeza de la bomba (H) en unidades de longitud, medida a un corte de agua determinado, teniendo en cuenta los cambios de condición etapa por etapa mediante un balance de energía mecánica y la curva de operación de la bomba instalada. El algoritmo de solución de la bomba se ilustra en la Figura 6, en la cual se enumeran los pasos de la secuencia de cálculo, referidos igualmente en la descripción detallada del modelo, realizada a continuación.

Las entradas de este modelo (49) son las presiones (PI, PD) y temperatura (TI) del fluido antes y después de la bomba, la frecuencia (ω_e), así como el corte de agua estimado mediante el modelo de tubería y curva de operación de la bomba. La salida (56) corresponde al flujo total que extrae el sistema de levantamiento BES del pozo, la temperatura de descarga de la bomba (TD**bomba**) y la cabeza de la bomba (H).

El modelo de la bomba está basado en el cálculo de la cabeza (H) de la curva de operación de la bomba, a partir de un flujo supuesto (50). Esta curva es elaborada a partir de datos experimentales tomados con agua como fluido a condiciones estándar, generalmente

presentados a una frecuencia de giro de 3500 rpm. Por consiguiente es necesario corregir la curva a la velocidad de giro real, por medio de las leyes de afinidad de la bomba (53):

$$\frac{F_1}{F_2} = \frac{w_{m1}}{w_{m2}} \quad (\text{Ecuación 6})$$

$$\frac{H_1}{H_2} = \left(\frac{w_{m1}}{w_{m2}} \right)^2 \quad (\text{Ecuación 7})$$

$$5 \quad \frac{Peje_1}{Peje_2} = \left(\frac{w_{m1}}{w_{m2}} \right)^3 \quad (\text{Ecuación 8})$$

La cabeza (H) calculada se convierte en presión por medio de un balance de energía mecánica (54) aplicado en cada etapa (51) de la bomba, el cual, involucra la densidad del fluido de bombeo (ρ) y la altura de cada etapa (ΔZ):

$$\Delta P = \rho g H - \Delta Z \quad (\text{Ecuación 9})$$

Cuando el fluido difiere notablemente de las propiedades del agua (fluido de alta viscosidad o fluido con contenidos de gas no disuelto), la curva de operación de la bomba es corregida previamente por medio de factores de corrección. Para el caso de alta viscosidad, se aplica la norma ANSI/HI 9.6.7-2010 con el fin de obtener los siguientes factores de corrección de viscosidad: de caudal (C_{qv}), cabeza (Chv) y eficiencia (C_{nv}). Para el caso de contenidos considerables de gas libre, se aplica una metodología similar a la norma ANSI/HI 9.6.7-2010, con el fin de obtener los siguientes factores de corrección de gas: (C_{qg}), cabeza (Chg) y potencia (C_{pg}).

El proceso de cálculo en la bomba se realiza etapa por etapa (51), calculando así, todas las condiciones en la descarga entre etapas, incluyendo la temperatura, la cual se determina mediante la capacidad calorífica (C_p) de la mezcla, la potencia de bomba ($Peje$), el flujo (F), la gravedad del fluido (ρ) y la eficiencia de la bomba (η) obtenida mediante la curva de eficiencia caracterizada de la bomba.

El proceso en la bomba finaliza cuando la presión calculada en la última etapa es la misma que la suministrada por el sensor de presión de descarga de la bomba (50).

E. Modelo de tubería:

Este modelo calcula iterativamente el corte de agua que justifica la caída de presión total (Presión de descarga de la bomba PD – Presión de cabeza de pozo THP) medida a un flujo determinado (F), teniendo en cuenta los cambios de las condiciones en secciones finitas mediante un balance de pérdidas de presión. El algoritmo de solución del modelo de tubería se ilustra en la Figura 7, en la cual se enumeran los pasos de la secuencia de cálculo, referidos igualmente en la descripción detallada del modelo, realizada a continuación.

Las variables de entrada (57) al modelo son Temperatura de Cabeza (WHT), Presión de Cabeza (THP), Temperatura de Fondo (TI), Presión de Descarga (PD) y Flujo (F), mediciones provenientes de los sensores de superficie y fondo, y del modelo de bomba. La variable de salida (63) corresponde al corte de agua (WC).

Inicialmente se establece un corte de agua razonable (WC0) igualándolo al medido en el laboratorio (WCI) o a estimaciones anteriores (WCa) (58):

Se divide la tubería de longitud total L_t , en M_t segmentos pequeños de longitud Δx (59).

La presión en cada segmento (j) de la tubería es P_j . Tomando como referencia la cabeza de pozo, para el segmento inicial, P_1 se iguala a la presión en cabeza de pozo.

La temperatura en cada segmento (j) de la tubería T_j se calcula utilizando un perfil de temperatura considerado lineal entre la descarga de la bomba y la cabeza del pozo, definiendo un diferencial de temperatura entre los segmentos ΔT .

Para cada segmento (j) son evaluadas las propiedades densidad y viscosidad de cada fase (aceite, agua y gas) y las propiedades de las fases mezcladas, por medio del modelo de fluido, a las condiciones obtenidas (P_j y T_j). Con estas propiedades se calcula el valor de Reynolds (Re) en el segmento (j):

Con la velocidad del fluido (v) y el coeficiente de rugosidad de la tubería (E) se estima el coeficiente de fricción (f), la caída de presión por fricción (P_{fj}) y la hidrostática (P_{hj}) del segmento (j) (60).

Si el pozo presenta altas producciones de gas y por lo tanto posible presencia de flujo multifásico en alguna sección de la tubería de producción, se recurre a modelos empíricos y mecanicistas de amplio uso y reportados en la literatura, usados en la simulación de fluidos en tuberías con las cuales se obtiene el factor de fricción correspondiente y régimen de flujo.

Se calcula el aumento de presión por cada división y la presión del siguiente segmento (j) (61).

Si al evaluar los M_t segmentos de la tubería, la presión (P_{Mt}) es igual a la presión en la descarga (PD) de la bomba (62), entonces el corte de agua corresponde con el corte de agua supuesto, si no se supone un nuevo corte de agua (58) repitiendo el proceso hasta que se cumpla esta condición.

F. Modelo de eficiencia energética:

Mediante este modelo se realiza la medición virtual en tiempo real de la eficiencia energética (EFE) para pozos con sistemas BES en términos del consumo kW-día por barril diario producido y normalizado por cada 1000 ft de levantamiento vertical.

5

El procedimiento para el cálculo de la medición virtual de eficiencia energética consiste inicialmente en estimar la potencia diaria (65) entregada al sistema de levantamiento artificial mediante la ecuación 47, usando como datos de entrada (64) las variables eléctricas del variador (01), corriente (I) (02), voltaje (V) (03) y el factor de potencia (FP) (05).

10

El algoritmo para el cálculo de la potencia (65) mediante la ecuación 47, obtiene como resultado una estimación de la potencia que consume el sistema de levantamiento artificial en kW-día. En el caso de un sistema trifásico el algoritmo permite usar el valor promedio de la corriente y voltaje de las fases.

15

El valor de medición virtual de eficiencia energética (EFE) se obtiene usando la ecuación 48 (66) que relaciona la medición virtual de flujo (F) expresada en barriles por día, la profundidad de nivel de fluido (PNF) normalizada por cada 1000 ft de levantamiento vertical y la potencia estimada mediante la ecuación 47:

20

La profundidad de nivel del fluido (PNF) corresponde al levantamiento vertical que se infiere del nivel de fluido dinámico del pozo (nivel al cual el nivel estático desciende en la tubería cuando el pozo produce en condiciones de bombeo).

25

El algoritmo de solución para el cálculo de la medición virtual en tiempo real de eficiencia energética del pozo productor (EFE) se ilustra en la Figura 8, en el cual se enumeran los pasos efectuados de la secuencia de cálculo.

30

Con fundamento en la descripción detallada de la invención, la presente solicitud propone en conjunto un sistema y método para la medición virtual en tiempo real del flujo de producción, corte de agua, cabeza de la bomba y eficiencia energética en uno o varios pozos con sistema de levantamiento artificial por bombeo electro-sumergible (BES).

35

El sistema embebido internet de las cosas para la medición virtual en tiempo real del flujo de producción, corte de agua, cabeza de la bomba y eficiencia energética del pozo productor se describe en forma detallada a continuación, y una vista global del mismo se ilustra en la Figura 1:

40

(a). Los valores de las mediciones de las variables operacionales provienen de la instrumentación instalada en subsuelo (07 y 11), la instrumentación instalada en

superficie (06), la instrumentación instalada en el variador de velocidad (01) y la instrumentación de inyección de diluyente (15). La instrumentación de los equipos de subsuelo comprende, presión de succión (PI) (11), presión de descarga (PD) (07), temperatura de succión (TI) (11) y temperatura del motor (TM) (11). La instrumentación de superficie comprende, cabeza (THP) (06) y temperatura de cabeza (WHT) (06). La instrumentación del variador (01) comprende la corriente (I) (02), el voltaje (V) (03), la frecuencia eléctrica (ω_e) (04) y el factor de potencia (FP) (05). La instrumentación de inyección de diluyente, comprende el flujo de nafta (15).

(b). La información de los valores de las variables operacionales provenientes de la instrumentación instalada en subsuelo (07, 11), la instrumentación instalada en superficie (06), la instrumentación instalada en el variador de velocidad (01) y la instrumentación de inyección de diluyente (15), es transmitida hacia una unidad central en donde cada una de las variables convergen en un dispositivo para su transmisión hacia otros equipos de control (PLC). La consulta de instrumentos se realiza a través de un dispositivo switch de conexión Ethernet (16), el cual, incluye el protocolo de comunicación MODBUS TCP/IP.

(c). El dispositivo (17) de adquisición de señales, repositorio en base de datos en tiempo real, procesamiento, cálculo, transmisión y presentación de resultados para la medición virtual en tiempo real presentado se instala en las facilidades de control e instrumentación del pozo, ya sea en el gabinete de control o en su propio gabinete dentro del sitio.

(d). El dispositivo (17) efectúa la lectura de los datos y valores más recientes de las variables operacionales para cada uno de los pozos conectados al sistema de medición virtual en tiempo real. El dispositivo puede ser implementado para uno o múltiples pozos.

(e). A partir de las lecturas de datos de los instrumentos de pozo (16), el dispositivo efectúa el cálculo y cómputo de la información mediante sus módulos interconectados (18, 19, 20, 21, 24), determinando para cada tiempo de muestreo el valor del flujo de producción y eficiencia energética.

(f). La nueva información obtenida por el dispositivo, es guardada internamente en un archivo histórico, dentro de la unidad de repositorio en base de datos en tiempo real interno en el dispositivo, conteniendo todos los datos y mediciones efectuadas por el dispositivo durante su funcionamiento continuo.

(g). El dispositivo (17) efectúa la presentación y visualización de los datos de flujo de producción, corte de agua, cabeza de la bomba y eficiencia energética del pozo en la interfaz HMI (24), permitiendo al usuario observar en tiempo real, el estado y los cambios de las variables del pozo durante su operación.

(h). El dispositivo organiza la información de datos de flujo de producción, corte de agua, cabeza de la bomba y eficiencia energética del pozo, para ser enviadas mediante el enlace de comunicación GSM (22) hacia la nube para visualización y repositorio en base de datos en tiempo real (23). Gráficos de operación en la nube presentan para

visualizar, consultar y manipular información en tiempo real del estado y los cambios que presenta el pozo durante su operación.

El método implementado en soporte lógico de programación en el sistema embebido internet de las cosas para la medición virtual en tiempo real de flujo de producción, corte de agua, cabeza de la bomba y eficiencia energética del pozo, se describe en forma detallada a continuación, y una vista global del mismo se ilustra en la Figura 3:

- (a). El dispositivo efectúa inicialmente su rutina para la consulta de datos y variables para los sensores e instrumentos del sistema de levantamiento artificial para el pozo (23).
- (b). Se efectúa la medición del voltaje (V), la corriente (I), la frecuencia eléctrica ($\omega\epsilon$) y el factor de potencia (FP) proporcionados al motor (10) mediante sensores eléctricos (02), (03), (04) y (05) ubicados entre el variador (01).
- (c). Se efectúa la medición de la temperatura de succión (TI) y la presión de succión (PI) mediante el sensor ubicado en el fondo del pozo (11) antes del motor (10).
- (d). Se efectúa la medición de la temperatura del motor (TM) mediante el sensor ubicado en el fondo del pozo (11).
- (e). Se efectúa la medición de la presión de descarga (PD) mediante el sensor ubicado en el fondo del pozo (07) después de la bomba (08).
- (f). Se efectúa la medición de la temperatura de cabeza (WHT) y la presión de cabeza (THP) mediante el sensor ubicado en superficie (06).
- (g). Una vez verificado que todos los datos de sensores e instrumentación han sido adquiridos correctamente (26) por el dispositivo (17) mediante el módulo de internet de las cosas - IoT (18), se organiza las variables para iniciación de la medición virtual en tiempo real (27).
- (h). Se efectúa el cálculo de la medición virtual en tiempo real (28) mediante el envío de datos desde el módulo de internet de las cosas - IoT (18), al procesador dedicado en el módulo de procesamiento (19). El módulo de procesamiento contiene dentro de su soporte lógico los algoritmos matemáticos optimizados para efectuar de manera eficiente los cálculos requeridos para la medición virtual en tiempo real del flujo de producción, corte de agua, cabeza de la bomba (29) y eficiencia energética (30).
- (i). Mediante el modelo de motor, se determina el deslizamiento esperado del motor (S) y la velocidad de giro de la bomba (ω_m), utilizando las variables medidas del paso (b).
- (j). Mediante el modelo de fluido, se determinan las propiedades de cada fase y las propiedades mezcladas del fluido a una temperatura y presión definida.
- (k). Mediante el modelo del separador, se determina el flujo de gas que entra a la bomba (fgb) y la presión de succión de salida del separador (PIs), utilizando las variables medidas del paso (c), el corte de agua supuesto y el flujo total supuesto en fondo

que se obtiene en el paso (j), y la velocidad de giro mecánico (ω_m) obtenido en el paso (i).

(l). Mediante el modelo de bomba, se determina la presión de descarga de la bomba (PDbomba), el flujo preliminar de producción, cabeza preliminar de la bomba y la temperatura de descarga de la bomba (TDbomba), utilizando las variables medidas del paso (c) (reemplazando la presión de succión (PI) por la presión de succión de salida del separador (PIs) si existe un equipo separador de gas o conservando la presión de succión (PI) si no existe), el corte de agua supuesto en el paso (j) y la velocidad de giro mecánico (ω_m) obtenida en el paso (i).

(m). Mediante el modelo de tubería, se determina la presión de descarga de la bomba (PDtubería), utilizando las variables medidas del paso (e) y (f), la temperatura de descarga de la bomba (TDbomba) obtenida en el paso (l) y el corte de agua supuesto en el paso (j).

(n). Mediante el modelo de eficiencia energética del pozo (Figura 8) se calcula la eficiencia energética del pozo (EFE).

(o). A partir del cómputo efectuado para cada modelo, se establece el parámetro de flujo de producción del pozo, corte de agua, cabeza de la bomba y la eficiencia energética para el pozo con sistema de levantamiento artificial con bomba electro-sumergible. Finalmente se obtiene la medición virtual en tiempo real del flujo de producción, corte de agua, cabeza de la bomba y eficiencia energética relacionada a la operación del pozo para el muestreo realizado (31).

(p). Una vez el módulo de procesamiento (19) efectúa el cálculo, se organiza los datos resultantes (31) y son enviados nuevamente al módulo de internet de las cosas - IoT (18).

(q). Una vez obtenidas las mediciones, se configura los puertos del módulo de entradas y salidas - I/O (20) y se establece la lectura y escritura de cada uno de los puertos de entrada y salida que interactúan con el módulo de entradas y salidas - I/O (32).

(r). El módulo de internet de las cosas - IoT (18) efectúa la operación de repositorio en base de datos en tiempo real de las variables y resultados de la medición virtual realizada, en un archivo binario, así mismo, realiza la rutina de envío de los valores de flujo de producción, corte de agua, cabeza de la bomba y eficiencia energética hacia los gráficos de operación en la pantalla local o en la nube computacional, para su visualización (33).

(s). Se presentan y visualizan los resultados obtenidos para cada uno de los pozos petroleros conectados al dispositivo (17), así como el estado de conexión de los sensores e instrumentación en tiempo real, mediante el módulo de interfaz HMI (24) conectada al sistema (34).