

SENSOR PARA LA DETECCIÓN Y MEDICIÓN DE SÓLIDOS SUSPENDIDOS EN AGUA DE ALTA RESOLUCIÓN

5 RESUMEN

Se describe un sensor para la medición de los sólidos suspendidos en aguas, basado en las técnicas de transmitancia y retro dispersión, diseñado para la medición de sólidos suspendidos en aguas con presencia de hidrocarburos y mezclas de agua y otros fluidos. El sensor comprende unas fuentes y receptores de radiación electromagnética, un sistema mecánico o encapsulado de polímero de bajo coeficiente de fricción, un sistema electrónico de procesamiento y control que entrega una salida de voltaje proporcional a la concentración de sólidos suspendidos en agua y un sistema de alimentación eléctrica del sistema basado en baterías recargables y fuentes de energía como paneles solares, generadores eólicos o redes eléctricas industriales.

CAMPO DE LA INVENCION

La invención se desarrolla en el campo de los sensores y transductores para la medición de la concentración de sólidos suspendidos en agua de alta resolución. Se describe un sensor basado en mediciones ópticas que logra detectar la concentración de sólidos suspendidos con una resolución de partes por millón. El sensor comprende un sistema mecánico de emisores y receptores de radiación electromagnética aislados por un soporte de materiales dieléctricos, ópticamente transparentes que puede ser sumergido en el agua o insertado en tuberías de agua de baja presión, un sistema electrónico de procesamiento y control que entrega una salida de voltaje proporcional a la concentración de sólidos suspendidos en agua y un sistema de alimentación eléctrica del sistema basado en baterías recargables y fuentes de energía como paneles solares, generadores eólicos o redes eléctricas industriales.

ESTADO DE LA TÉCNICA

En los últimos años se ha realzado la importancia del correcto manejo del agua, considerándolo un recurso finito, por lo cual existe una tendencia al aumento en la regulación para su uso y explotación. En ese orden de ideas el monitoreo de la calidad del agua surge como una herramienta fundamental en el conocimiento y manejo de este recurso aplicadas prácticamente a todas las industrias que existen. En la industria del petróleo se produce un gran porcentaje de agua junto con los hidrocarburos. Globalmente por cada barril de petróleo producido se producen tres barriles de agua. Esta gran cantidad de recurso hídrico producido, se ve como una oportunidad valiosa de poder destinar el agua de producción en varias posibles aplicaciones. En el caso de Colombia, el uso que se le pueda dar al agua después de sus correspondientes procedimientos de tratamiento, dependerá básicamente de su calidad, siendo principalmente tres sus posibles usos: reinyección, vertimiento y uso agroindustrial.

Uno de los parámetros más importantes de calidad de agua, que se miden en las plantas de tratamiento de Ecopetrol es la concentración de sólidos suspendidos medido en partes por millón. A pesar de que el parámetro es un estándar en múltiples industrias y procesos, la medición de sólidos suspendidos en agua de producción de hidrocarburos conlleva retos complejos. El más relevante se presenta debido a que las gotas de crudo pueden confundirse fácilmente con sólidos suspendidos, haciendo que muchos de los sensores utilizados en la medición de aguas crudas no generen mediciones precisas en las aguas de producción de hidrocarburos. Para evitar la interferencia en la medición, múltiples radiaciones electromagnéticas deben ser probadas para encontrar aquella que permita que las gotas de grasas o aceites no interactúen con la señal de medición.

La medición de concentración de sólidos suspendidos por técnicas ópticas se basa principalmente en dos tipos de principios físicos. El primero es la nefelometría. Bajo este método un haz de radiación electromagnética se envía a la muestra de agua con sólidos

suspendidos que se desea medir. Esta radiación se dispersa debido a la interacción con las partículas suspendidas y la cantidad de energía dispersada se mide a un ángulo de 90 grados. La segunda técnica es llamada transmitancia. En esta técnica, el haz de luz incide directamente sobre las partículas en suspensión y la radiación se transforma en otro tipo de energía, reduciendo su intensidad. La energía se mide a un ángulo de 180 grados con el fin de identificar la cantidad de sólidos suspendidos. Las dos técnicas presentadas son complementarias en el sentido que la primera es útil para rangos medios o bajos de sólidos suspendidos mientras que la segunda funciona muy bien para concentraciones medias y altas. El dispositivo de medición presentado en esta patente combina ambas técnicas en un solo encapsulado, permitiendo medir rangos amplios de sólidos suspendidos.

El sensor de sólidos suspendidos en agua está ubicado sobre un soporte oleofóbico a prueba de agua que flota, se hunde o se sostiene sobre la superficie del agua. Adicionalmente, el sensor puede ser insertado en cualquier tubería con diámetro mayor a 3 pulgadas. A través de una electrónica de acondicionamiento de señales y telemetría, se envía la señal procesada de los sensores hacia un concentrador de señales o HUB, que se encarga de almacenar, gestionar las comunicaciones, visualizar la información y enviar, si así se requiere, la información a una base de datos en internet para su posterior visualización a través de una aplicación web. Esta aplicación puede ser consultada por cualquier dispositivo (computador, tableta o celular) con conexión a internet.

Con el propósito de identificar el estado de madurez de la tecnología y las compañías que en el mundo participan en la generación de investigación, desarrollos tecnológicos y/o innovaciones para procesos asociados al monitoreo, inspección, medición de sólidos totales suspendidos en agua, se adelantó la siguiente búsqueda en el estado de la técnica.

En el mercado existen sistemas que proporcionan servicios o elementos similares a la presente solicitud de patente, como se ha mencionado, de las cuales cabe resaltar:

La patente número **US5923433A** titulada "*OVERMOLDED FLOWTHROUGH TURBIDITY SENSOR*" que consiste de un sensor para la medición de turbidez del agua usando plástico de alta resistencia, con radiación sin referencia a una longitud de onda en particular y aislamiento de la luz exterior. Tiene la capacidad de medir turbidez en agua en movimiento. La reclamación de la patente implica un sensor de turbidez con capacidad de medir la interacción de cualquier radiación electromagnética, sin especificar la longitud de onda, que puede colocarse en líneas de flujo, incluyendo todo un encapsulado que lo aísla de la radiación exterior, y el sistema para poder ser colocado en condiciones de flujo de agua.

La patente número **US5331177A** titulada "*TURBIDITY SENSOR WITH ANALOG TO DIGITAL CONVERSION CAPABILITY*" consiste de un sensor de turbidez basado en una fuente de radiación electromagnética (sin especificar la longitud de onda) que compara la radiación incidente y la dispersada por las partículas que se encuentran en el agua. Las reivindicaciones incluyen un sensor de turbidez compuesto de una fuente de radiación electromagnética y dos receptores de esa radiación electromagnética. El diseño del sensor evita la acumulación de burbujas que puede provocar errores en la medición.

La patente número **US5589935A** titulada "*TURBIDITY SENSOR WITH THE CAPABILITY OF REGULATING THE INTENSITY OF A LIGHT SOURCE*" consiste de un sensor de turbidez compuesto de un emisor led y dos receptores (sin especificar la longitud de onda) con capacidad de controlar la intensidad de luz del emisor. Las reivindicaciones incluyen un sensor de turbidez compuesto de una fuente de luz y dos receptores, uno de ellos colocado cerca del emisor y otro en un punto en el que la luz incidente deba atravesar el fluido. El sensor tiene la capacidad de controlar la intensidad de emisión del LED. El sensor se aplica para maquinas lavavajillas y lavarropas.

La patente número **US7659980B1** titulada "*NEPHELOMETRIC TURBIDITY SENSOR DEVICE*" consiste en un sensor de nefelometría - nefelómetro incluyendo un método la atenuación de entrada de aire, burbujas, vidrio anti-empañante y algoritmos de ajuste para la radiación. Las reivindicaciones incluyen un sensor nefelómetro para medir la concentración de sólidos en líquidos, incluyendo el emisor con óptica para la concentración de haces, con óptica para recepción de la luz dispersada y circuitos de acondicionamiento de señales.

La patente número **CN204376940 (U)** titulada: "FLOW MEASUREMENT AND CONTROL INSTRUMENT REMOTE REAL-TIME MONITORING SYSTEM BASED ON ZIGBEE AND GPRS", consiste en un instrumento para medición de flujo y un sistema de monitoreo remoto en tiempo real basado en tecnología de radio comunicación tipo Zigbee y GPRS, utilizado principalmente en el campo de la ingeniería petroquímica. El instrumento de medición de flujo y el sistema de monitoreo remoto en tiempo real es especialmente adecuado para un caso de medición de flujo y control de instrumentos que son instalados dispersamente o remotamente y, está compuesto por un instrumento de medición de flujo e instrumentos de control, una terminal Zigbee y "routers" Zegbee, módulos GPRS, un servidor y computadores. Las principales diferencias y desventajas de esta tecnología con respecto a la presente solicitud de patente es que aunque la invención describe un sistema de monitoreo remoto en tiempo real aplicable a aguas de producción de hidrocarburos, los componentes del sistema, su interacción y configuración difieren de la presente solicitud de patente en que no presentan sensores, un dispositivo de flotación que soporte los sensores, un software de monitoreo y una plataforma destinada para la recepción y visualización de los datos medidos, que si esboza la presente solicitud de patente.

La patente **US5828458A**, *TURBIDITY SENSOR*, que se caracteriza por tener un sensor de turbidez que puede usar en condiciones de campo compuesto de un emisor de radiación y dos receptores, uno que esta frente al emisor a través de un espacio para el líquido de medición, y otro receptor para medir la luz dispersada por las partículas en el agua. Incluye un sensor de temperatura para compensación y circuitos electrónicos de acondicionamiento de señales.

La patente **US20030196278A1**, *STATIC AND DYNAMIC TURBIDITY SENSING IN A WASHING APPLIANCE*, *STATIC AND DYNAMIC TURBIDITY SENSING IN A WASHING APPLIANCE*, que consiste de un método para medir la cantidad de detergente y grasas en el agua para maquinas lavavajillas y lavadoras basado en la diferencia de condiciones estáticas y dinámicas de la turbidez.

La patente **US7659980B1**. *NEPHELOMETRIC TURBIDITY SENSOR DEVICE*, que consiste en un sensor de turbidez nefelométrico para medir la concentración de sólidos en líquidos, incluyendo el emisor, con óptica para la concentración de haces, receptores con óptica para recepción de la luz dispersada y circuitos de acondicionamiento de señales.

En conclusión, las anteriores patentes no presentan los mismos componentes del sistema presentado en la presente solicitud de patente, que sugiera la misma interacción y configuración. En el mercado solo existen sistemas y dispositivos que proporcionan única o parciamente y de manera diferente servicios o elementos similares a la presente solicitud de patente.

DESCRIPCIÓN DETALLADA DE LOS DIBUJOS

Se presenta la descripción detallada de las figuras y fotografías a continuación.

Figura 1.: Diseño mecánico del sensor de solidos suspendidos en agua (8). A. Compuesto por un encapsulado de polímero de baja fricción (1) para las fuentes (3 y 5) y receptor de radiación (4) sellados y a prueba de agua. B. Un tubo de polímero de baja fricción de longitud variable con rosca exterior para ser ubicado en el módulo de sensores o en tubería externa.

Figura 2.: Diagrama esquemático general de las señales eléctricas en el sensor de solidos suspendidos totales. La señal original del sensor de solidos suspendidos (8) pasa por una etapa de amplificación y filtrado (9). Posteriormente la señal es adquirida por un microprocesador (14) a través de un conversor análogo digital (10) que transforma la señal de voltaje en una señal digital (11). Finalmente las mediciones (12) se envían mediante protocolo serial (13) hacia el módulo de transmisión inalámbrica o directamente a cualquier concentrador de señales.

Figura 3.: Módulo de Sensores Especializados o SWQ y la cámara de flotación o encapsulado (15) el cual se fabrica con materiales especiales de muy baja fricción y adherencia siendo sellado para poder sumergirse. Esta cámara incluye la electrónica de adquisición y los sensores de medición para TSS – Sólidos totales suspendidos en agua.

Figura 4.: El HUB cuenta con una fuente de poder (22) que puede ser cualquier tipo de dispositivo de energía verde (panel, eólico) o entrada de voltaje AC (110 o 220V). La fuente de poder entra a una caja (23) a prueba de agua que contiene los elementos principales del HUB. Internamente un controlador de carga (21) alimenta una batería de soporte (24) la cual energiza todo el sistema. El regulador de potencia (20) genera todos los voltajes que utilizan los demás elementos del HUB. Un computador embebido industrial (17) encargado de controlar todo el dispositivo. El computador embebido recibe la señal del módulo de sensores enviada vía radio (16) con una antena (18) que permite ampliar la distancia de transmisión. La computadora puede conectarse a internet, mediante el módulo de conexión a internet (19) múltiples alternativas tales como: GSM, 3G/4G, Ethernet, Wifi o internet satelital.

DESCRIPCIÓN GENERAL DE LA INVENCION

La turbidez (medida en NTU) es la falta de transparencia de un líquido debido a la presencia de partículas en suspensión. Cuantos más sólidos en suspensión haya en el agua, más sucia parecerá ésta y más alta será la turbidez. La turbidez es considerada una buena medida de la calidad del agua, cuanto más turbia, menor será su calidad. De esta forma la turbidez y los sólidos suspendidos totales son unidades estrechamente relacionadas. Los sólidos en suspensión o TSS (total suspended solids) indican la cantidad de sólidos (medidos en miligramos por litro - mg/l o ppm) presentes en suspensión y que pueden ser separados por medios mecánicos, como por ejemplo la filtración en vacío, o la centrifugación del líquido.

El sensor de sólidos suspendidos totales que se esboza en la presente solicitud de patente se basa principalmente en dos tipos de principios físicos. El primero, una técnica óptica llamada nefelometría. Un haz de radiación electromagnética se envía al medio donde se desean medir los sólidos suspendidos totales. Por su parte un fotodetector se ubica a noventa grados de la emisión de luz. Cuando en el agua existen partículas suspendidas, la radiación es dispersada hacia el detector. Entre mayor es la cantidad de luz medida por el foto-detector, hay más partículas suspendidas en el agua. La segunda técnica es llamada turbidimetría. En esta técnica el haz de luz incide directamente sobre las partículas en suspensión y la radiación se transforma en otro tipo de energía, reduciendo su intensidad. La energía se mide a un ángulo de 180 grados con el fin de identificar la cantidad de sólidos suspendidos. Las dos técnicas presentadas son complementarias, en el sentido que la primera es útil para rangos medios o bajos de sólidos suspendidos mientras que la segunda funciona muy bien para concentraciones medias y altas.

El dispositivo de medición presentado en esta patente combina ambas técnicas en un solo encapsulado, permitiendo medir rangos amplios de sólidos suspendidos. Adicionalmente, el sensor de sólidos suspendidos totales utiliza una fuente de radiación electromagnética que no interactúa con las gotas de hidrocarburo, reduciendo el efecto de error provocado en la medición de los sólidos suspendidos.

DESCRIPCIÓN DETALLADA DE LA INVENCION

El sistema sensor para la detección y medición de sólidos suspendidos en agua caracterizado por que comprende un *hardware*, un diseño mecánico, un *firmware*, un módulo lógico y un método inteligente de calibración. Donde cada una de las partes está constituido por:

1. El *hardware* consiste en un circuito electrónico que consta de dos emisores de radiación electromagnética de amplio espectro y un detector sintonizado a la radiación emitida. Adicionalmente el *hardware* cuenta con un microprocesador, analógico-

digital que se acopla con la señal medida y la procesa internamente para reducir el ruido electrónico.

2. El diseño mecánico consiste en la ubicación de los emisores a 90° y a 180° respecto al detector. Adicionalmente el diseño es optimizado para colimar las emisiones electromagnéticas mediante un recubrimiento cilíndrico de acetal, de modo que se limitan las ventanas de emisión y de recepción.
3. El *firmware* está diseñado para alternar la emisión de la radiación electromagnética para recibir una medición a la vez. Adicionalmente el *firmware* ajusta las condiciones de emisión electromagnética para controlar la precisión y resolución del sistema.
4. El módulo lógico se encarga de las siguientes funciones: primero, cuenta con un módulo que combina las ecuaciones embebidas asociadas a los principios de nefelometría y turbidimetría y determina las concentraciones de sólidos suspendidos. Segundo, el ajuste de acuerdo a las curvas de temperatura precargadas en el sistema. Tercero, almacenamiento en una base de datos interna. Cuarto, comunicación tanto inalámbrica como cableada.
5. El método inteligente de calibración consta de un procedimiento que adquieren medidas en múltiples patrones para obtener una función de transferencia lineal.
6. El *hardware* consta de una opción de sintonización de diferentes potencias para los emisores de radiación electromagnética que ajustan directamente la resolución y el rango de medición.
7. El sistema integral opera por dos principios de detección de la dispersión de la radiación asociada a la presencia de sólidos suspendidos en un medio, turbidimetría y nefelometría. El sistema integral utiliza los dos principios en forma complementaria de modo que cubre la determinación de concentraciones altas, medias y bajas de sólidos suspendidos en agua.

Adicionalmente el sensor integral de sólidos suspendidos en agua del que hacen parte los siguientes elementos: un dispositivo mecánico (8) tipo sonda incluyendo módulo de adquisición (9,10) que se ubica directo en el sitio, un módulo de procesamiento(11,12), comunicación, control y almacenamiento local, un software de monitoreo y gestión para plataforma web en línea y un método de monitoreo que permite la aplicación en diferentes ambientes, además de calcular un índice relativo de calidad de agua a partir de la medición de parámetros en tiempo real.

Sensor de sólidos suspendidos totales en agua:

- a. Sensor de sólidos suspendidos totales (8) en agua tipo sonda diseñado en materiales plásticos de bajo coeficiente de fricción (1) y ópticamente transparentes, con dos emisores (3 y 5) y un receptor (4) de radiación electromagnética los cuales se encuentran sellados (7) dentro de un container a prueba de agua (2,6). El sensor cuenta con una rosca exterior que permite ser enroscado tanto en tuberías como en un sistema de soporte oleofóbico (15) diseñado especialmente para la medición en cuerpos de agua estáticas (tanques) o en movimiento como piscinas, ríos, represas, lagos etc. La salida del sensor es un voltaje analógico que es filtrado (9), amplificado (10) y posteriormente adquirido por el microprocesador (14) que convierte la señal (11) de voltaje en la medición en unidades de ingeniería (12) (ppm).
- b. El módulo de procesamiento del sensor está conformado por un módulo de potencia con baterías recargables de 12 V (24) y un panel solar de 20W (22), aunque también puede ser conectado a la red eléctrica (110 o 220V) o a cualquier fuente de energía renovable. El sensor sólidos suspendidos cuenta con una caja electrónica de procesamiento con microprocesador que reciben la señal proveniente del sensor de sólidos suspendidos en agua un y módulo de transmisión (13) RF de cualquier tipo de frecuencia para el envío de la información procesada hacia el concentrador de señales.

- 5 c. El modulo concentrador de señales o Hub tiene como función principal el procesamiento de los datos provenientes del módulo sensor de solidos suspendidos, el almacenamiento de los datos y la gestión de las comunicaciones (radiofrecuencia y conectividad a internet). El HUB cuenta con un computador (17) embebido industrial encargado de controlar todo el dispositivo. El computador embebido recibe (18) la
- 10 señal del módulo de sensores enviada vía radio (16) de cualquier tipo de frecuencia y posteriormente aplica las funciones de transferencia de los sensores de solidos suspendidos en agua para convertir las unidades digitales en unidades de ingeniería. Adicionalmente el HUB almacena la información recolectada en su memoria interna y se encarga de gestionar el envío de los datos hasta un servidor web (19). La computadora puede conectarse a internet, mediante múltiples alternativas tales como: GSM, 3G/4G, Eternet wifi o internet satelital.

15 ***Software de monitoreo, gestión, manejo de datos e información y visualización remota a través de plataforma web personalizada:***

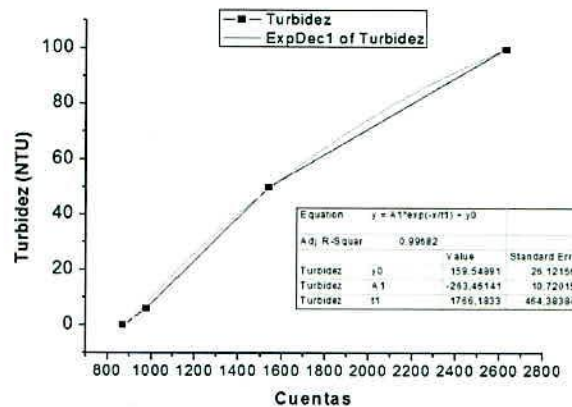
- 20 a. Software de monitoreo, procesamiento, gestión y transmisión de parámetros de solidos suspendidos totales dedicado el cual se ejecuta corriendo en el módulo de procesamiento bajo plataforma abierta con un protocolo propio diseñado para condiciones de campo con tramas especiales que se comunica a través de radios de baja potencia y de muy alta eficiencia, diseñado para aplicaciones remotas, seguras y en zonas con limitaciones de energía.
- 25 b. Plataforma de micro-servicios de adquisición de datos de alta eficiencia diseñada para conexiones de datos de baja calidad y capacidad la cual está permanentemente "escuchando" los módulos de procesamiento y control instalados en el campo con comunicación al internet remoto. La plataforma permite alta disponibilidad y al menos 99.5% de recepción de datos remotos de acuerdo a pruebas realizadas.
- 30 c. Plataforma web personalizada para la visualización de datos y generación de reportes conocida como safewireless.

EJEMPLOS

Calibración del sensor de solidos suspendidos en agua

5

Para calibrar el sensor de solidos suspendidos totales se debe contar con al menos 3 muestras de agua con concentraciones de sólidos conocidos. A partir de esas muestras se miden las cuentas digitales (O voltajes de salida) que representan cada valor y se grafican los resultados, tal y como se observa en la siguiente figura:



10

Gráfica 1. Respuesta sensor SST

El resultado genera una curva de regresión exponencial de respuesta del sensor en función de los valores de turbidez NTU. Así mismo, el sensor se calibra con muestras de agua medidas en unidades de solidos suspendidos totales (PPM). Un factor de conversión entre unidades de turbidez y solidos suspendidos totales puede ser aplicado con el objetivo de entregar dos valores de medición.

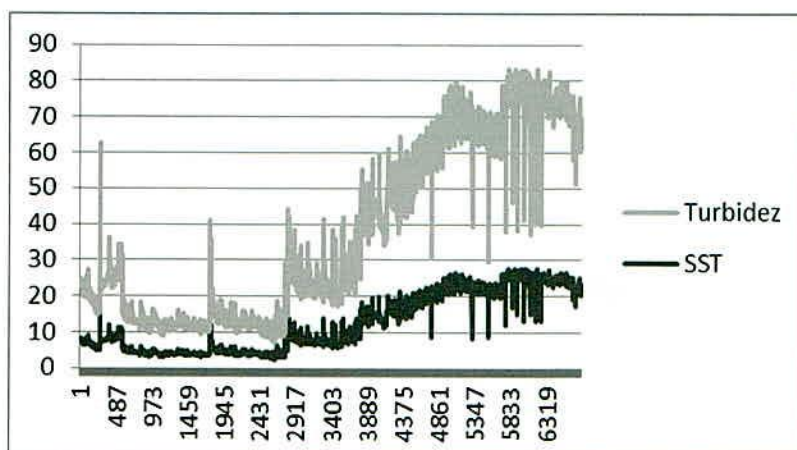
15

Ejemplo 1

20

La primera grafica muestra los resultados iniciales durante dos semanas de pruebas continuas en la medición de turbidez y solidos suspendidos. Las mediciones se realizaron en las piscinas de estabilización de la estación Acacias en campo Castilla. Las respuesta del sensor en unidades de turbidez y solidos suspendidos totales muestran una correlación en la medición. Así mismo, la tendencia y los valores medidos están en los mismos rangos de medición entregados por el laboratorio

25



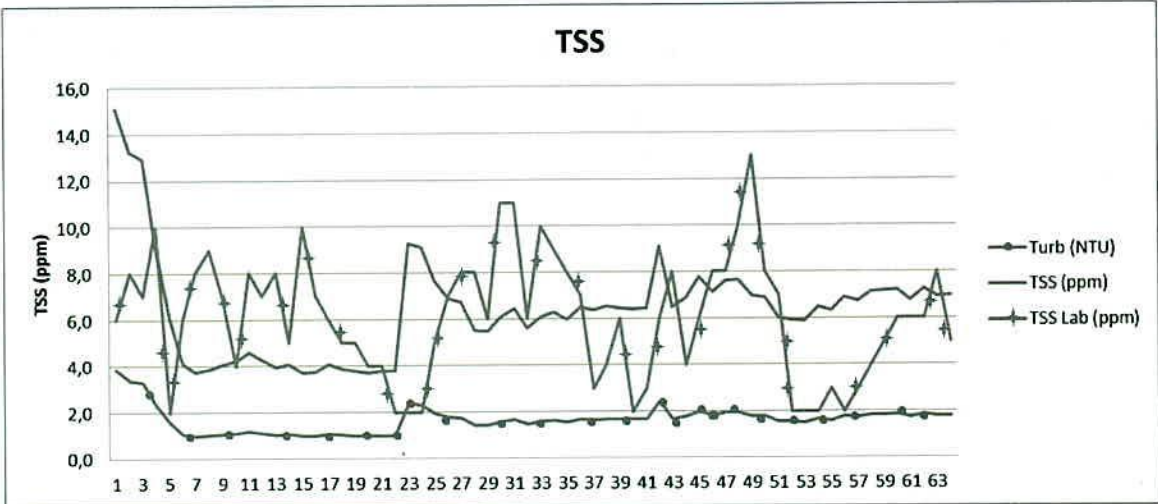
Gráfica 2. Sensor de Turbidez (NTU) y solidos suspendidos totales (SST)

30

Una vez calibrado y desde el 15 de noviembre de 2015 hasta el 15 de febrero de 2016, el dispositivo de calidad de agua estuvo en pruebas continuas de operación en el campo Castilla, específicamente la estación Acacias. El dispositivo fue ubicado en la piscina de estabilización de aguas que salen posteriormente al proceso de aspersión. En esta ocasión se compararon los datos medidos por el dispositivo de medición de solidos suspendidos

35

totales vs las mediciones entregadas por el laboratorio. A continuación se presentan los resultados de las pruebas de campo. Cada punto de medición corresponde al valor de solidos suspendidos medido en una hora especifica del día.



Gráfica 3.Comparación de medición en campo vs medición en laboratorio en dos meses de pruebas

Los valores de solidos suspendidos totales se encuentran correctamente relacionados toda vez que la medición de laboratorio se hace tomando una muestra de agua mientras que el dispositivo se encuentra dentro de la piscina de estabilización por lo que el punto de medición no es el mismo. A partir de los resultados se puede observar tendencias similares en los valores medidos, con órdenes de magnitud en el mismo grupo (menores a 14 ppm). Se observa además que los efectos de hidrocarburos en el agua se han podido reducir a tal punto que no representan una interferencia en la medición.