

**MEJORA DEL PROCESO DE MEDICIÓN DE CORTE DE AGUA PARA
PRUEBAS DE PRODUCCIÓN DE POZOS APLICANDO TECNOLOGÍAS DE
MEDICIÓN EN TIEMPO REAL Y ESTÁNDARES INTERNACIONALES PARA
DISMINUIR SU INCERTIDUMBRE EN LOS CLUSTERS A Y B DEL CAMPO EN
ESTUDIO**

FABIÁN EDUARDO MOTTA HURTADO

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO QUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA DE PETRÓLEOS
MAESTRIA EN INGENIERÍA DE PETRÓLEOS Y GAS
BUCARAMANGA**

2018

**MEJORA DEL PROCESO DE MEDICIÓN DE CORTE DE AGUA PARA
PRUEBAS DE PRODUCCIÓN DE POZOS APLICANDO TECNOLOGÍAS DE
MEDICIÓN EN TIEMPO REAL Y ESTÁNDARES INTERNACIONALES PARA
DISMINUIR SU INCERTIDUMBRE EN LOS CLUSTERS A Y B DEL CAMPO EN
ESTUDIO**

FABIAN EDUARDO MOTTA HURTADO

Trabajo de grado para optar por el título de
Magister en Ingeniería de Petróleos y Gas

Director

FREDY OMAR NIÑO FLOREZ

Ingeniero de Petróleos

Magister en Ingeniería Industrial

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO QUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA DE PETRÓLEOS
MAESTRIA EN INGENIERÍA DE PETRÓLEOS Y GAS
BUCARAMANGA**

2018

CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	15
1. CONTEXTO PROBLEMÁTICO.....	17
1.1 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA	17
1.2 OBJETIVOS.....	17
1.2.1 Objetivo General	17
1.2.2 Objetivos Específicos	18
1.3 JUSTIFICACIÓN.....	19
1.4 ALCANCE	20
2. MARCO DE REFERENCIA.....	21
2.1 ANTECEDENTES INVESTIGATIVOS.....	21
2.2 MARCO TEÓRICO – CONCEPTUAL.....	22
2.2.1 Principios de medición de corte de agua en la industria petrolera	22
2.2.2 Principio Coriolis.....	24
2.2.3 Absorción de rayos infra Rojos	25
2.2.4 Absorción de Rayos Gamma	27
2.2.5 Constante dieléctrica.....	30
2.2.6 Resonancia de Microondas.....	32
2.2.7 Capacitancia	33
2.3 MARCO PRÁCTICO	36
3. CAPÍTULO 1: DIAGNÓSTICO PRELIMINAR DE LA MEDICIÓN DE CORTE DE AGUA	38

3.1	CONDICIONES ACTUALES DE MUESTREO	38
3.1.1	Muestreo manual.....	38
3.1.2	Toma Muestras en Cabeza de Pozo	39
3.2	ANÁLISIS DE LABORATORIO	40
3.3	LIQUIDACIÓN DE PRUEBAS DE POZO	42
3.3.1	Efecto de Temperatura en Corte de Agua.....	43
3.3.2	Efecto de la Presión en el corte de agua.....	44
4.	CAPÍTULO 2: RECOMIENDACIONES DE NORMAS Y ESTÁNDARES INTERNACIONALES DE MEDICIÓN.....	45
4.1	BUENA DISPERSIÓN DE LA MUESTRA.....	45
4.2	ÁREA DE MUESTREO.....	46
4.3	DISEÑO DE LA SONDA DEL TOMA MUESTRAS	47
4.4	LIQUIDACIÓN DE CORTE DE AGUA Y PRUEBAS DE PRODUCCIÓN .	48
4.4.1	Cálculo de Corte de Agua a condiciones de Medición	49
4.4.2	Liquidación de pruebas de producción de pozos según API MPMS Cap 20.1	50
5.	CAPÍTULO 3: ANÁLISIS COMPARATIVO DE TECNOLOGÍAS DE MEDICIÓN DE CORTE DE AGUA EN TIEMPO REAL	53
5.1	METODOLOGÍA DE CALIFICACIÓN Y SELECCIÓN DE TECNOLOGÍAS	53
5.1.1	Criterios de Selección	53
5.1.2	Asignación de puntaje	54
5.1.3	Calificación y selección de tecnologías	55
6.	CAPÍTULO 4: ESTRATEGIA DE MEJORA (REDUCCIÓN DE LA INCERTIDUMBRE) DE MEDICIÓN DE CORTE DE AGUA	57

6.1	ASEGURAMIENTO DE UNA BUENA DISPERSIÓN DEL FLUIDO	57
6.2	MUESTREO APROPIADO	57
6.3	ANÁLISIS DE LABORATORIO	59
6.4	IMPLEMENTACIÓN DE LA TECNOLOGÍA DE MEDICIÓN DE CORTE DE AGUA EN TIEMPO REAL DE ABSORCIÓN DE INFRAROJOS (NIR).....	59
6.5	ADECUADA LIQUIDACIÓN DE CORTE DE AGUA Y VOLÚMENES	61
7.	CAPÍTULO 5: IMPLEMENTACIÓN (PRUEBA PILOTO).....	63
7.1	VALIDACIÓN DE VELOCIDADES DE FLUJO EN LOS CLUSTERS A Y B 63	
7.1.1	Clúster A	63
7.1.2	Clúster B	64
7.2	TOMA MUESTRAS.....	64
7.3	PRUEBA PILOTO - MEDIDOR RED EYE	65
7.3.1	Calibración	65
7.3.2	Instalación y puesta en operación	71
7.3.3	Monitoreo y control Remoto	74
7.3.4	Protocolo de pruebas	77
7.3.5	Resultado	82
8.	CAPÍTULO 6: EVALUACIÓN DE RESULTADOS.....	85
8.1	VALIDACIÓN DE LA CONFORMIDAD DE LA MEDICIÓN RED EYE	85
8.1.1	Red Eye instalado en el Clúster A.....	85
8.1.2	Red Eye instalado en el Clúster B.....	87
8.2	PRUEBA DE REPETIBILIDAD	88
8.2.1	Dispersión de los datos – Clúster A	88

8.2.2	Dispersión de los datos – Clúster B	89
8.3	ESTIMACIÓN DE INCERTIDUMBRE.....	90
8.3.1	Evaluación tipo A de la incertidumbre típica (Repetibilidad).....	91
8.3.2	Incertidumbre por resolución del instrumento	95
8.3.3	Incertidumbre combinada.....	96
8.3.4	Incertidumbre expandida.....	97
9.	CONCLUSIONES.....	101
	BIBLIOGRAFÍA.....	104

LISTA DE FIGURAS

Ilustración 1: Tecnología Tipo Coriolis	25
Ilustración 2: Principio de funcionamiento Absorción de rayos infra rojos	25
Ilustración 3: Principio de funcionamiento Absorción de rayos infra rojos	26
Ilustración 4: Tecnología Absorción de rayos gamma.	29
Ilustración 5: Polarización de un medio dieléctrico colocado dentro del campo eléctrico	30
Ilustración 6: Cambio en la permitividad relativa de la mezcla de aceite / agua en diferentes cortes de agua	31
Ilustración 7: Configuración del sensor de WC capacitivo basado en electrodo coaxial típico.	34
Ilustración 8: Posibles configuraciones de sensores capacitivos conformales para mediciones de corte de agua. (a) Un par de tiras semicilíndricas; (b) dos pares de tiras semicilíndricas, (c) tres pares de tiras semicilíndricas, (d) dos electrodos anulares, y (e) electrodos de doble hélice	34
Ilustración 9: Histórico de producción del campo en estudio.	37
Ilustración 10: Proceso de toma de muestras cabeza de pozo.....	39
Ilustración 11: Condición de muestreo actual en el campo de estudio.	39
Ilustración 12: Toma muestras recomendado por API MPMS Cap. 8.2.....	40
Ilustración 13: Análisis de Laboratorio para corte de Agua en el Campo en Estudio.	41
Ilustración 14: Modelo matemático de liquidación de pruebas de producción.	42
Ilustración 15: Área de muestreo recomendada por API MPMS Cap. 8.2.	47
Ilustración 16: Diseños de la sonda de muestreo.	48
Ilustración 17: Recomendación de diseño e instalación de sonda toma muestras.	58
Ilustración 18: Medidor Red Eye MP.....	60
Ilustración 19: Toma muestras fabricado para Clúster A y B.	65

Ilustración 21: Muestra Pozo 1123H patrón de crudo deshidratado.	66
Ilustración 22: Procedimiento calibración punto 1 (Aire) - Software Red Eye.	67
Ilustración 23: Procedimiento calibración punto 2 (Agua).	68
Ilustración 24: Calibración de agua – Software Red Eye.	68
Ilustración 25: Procedimiento calibración punto 3 – crudo deshidratado.	69
Ilustración 26: Procedimiento calibración punto 3 – crudo deshidratado.	69
Ilustración 27: Calibración de agua – Software Red Eye.	70
Ilustración 28: Medidor Red Eye instalado en clúster A.	71
Ilustración 29: Medición Red Eye en clúster A.	72
Ilustración 30: Medidor Red Eye instalado en clúster B.	73
Ilustración 31: Medidor Red Eye instalado en clúster B.	74
Ilustración 32: Sistema Central de Clúster.	74
Ilustración 33: PLC Control Logix SCC – Tarjeta de comunicaciones Prosoft.	75
Ilustración 34: Pantalla HMI del Sistema Central de Clúster.	76
Ilustración 35: Zoom selección de pozo a prueba.	76
Ilustración 36: Muestreo Clúster A - Prueba piloto.	79
Ilustración 37: Muestreo Clúster B - Prueba piloto.	79
Ilustración 38: Muestra # 1 de la prueba piloto.	80
Ilustración 39: Análisis muestras de la prueba piloto.	81
Ilustración 40: Resultado seguimiento prueba piloto clúster A.	83
Ilustración 41: Resultado seguimiento prueba piloto clúster B.	83
Ilustración 42: Validación de conformidad de medición Red Eye – Clúster A.	86
Ilustración 43: Validación de conformidad de medición Red Eye – Clúster B.	87
Ilustración 44: Distribución normal de medición de corte de agua – Clúster A.	89
Ilustración 45: Distribución normal de medición de corte de agua – Clúster B.	90

LISTA DE TABLAS

Tabla 1: Principales tecnologías de medición de corte de agua en la industria petrolera.....	23
Tabla 2: Guía general de velocidades de flujo mínimas versus elementos de mezclado.	46
Tabla 3: Tabla comparativa de tecnologías de medición de corte de agua en tiempo real.....	55
Tabla 4: Tecnologías elegibles para la prueba piloto en el Campo en Estudio.....	56
Tabla 5: Validación de velocidades de flujo clúster A.	63
Tabla 6: Validación de velocidades de flujo clúster B.	64
Tabla 7: Configuración de pozos del clúster A según calibración pozo a pozo.	70
Tabla 8: Configuración de pozos del clúster B según calibración pozo a pozo.	70
Tabla 9: Cronograma de prueba Red Eye Clúster A.....	77
Tabla 10: Cronograma de prueba Red Eye Clúster B.....	78
Tabla 11: Registro de seguimiento de prueba para clúster A.	82
Tabla 12: %Éxito - clúster A.....	86
Tabla 13: %Éxito - clúster B.....	87
Tabla 14: Prueba de repetibilidad clúster A.	91
Tabla 15: Prueba de repetibilidad clúster B.	92
Tabla 16: Incertidumbre por repetibilidad clúster A.....	93
Tabla 17: Incertidumbre por repetibilidad clúster B.....	94
Tabla 18: Incertidumbre expandida - clúster A.	98
Tabla 19: Incertidumbre expandida - clúster B.	99
Tabla 20: Incertidumbre expandida promedio - clúster A.....	100
Tabla 21: Incertidumbre expandida promedio - clúster B.....	100

RESUMEN

TITULO: Mejora del proceso de medición de corte de agua para pruebas de producción de pozos aplicando tecnologías de medición en tiempo real y estándares internacionales para disminuir su incertidumbre en los clúster A y B del Campo en Estudio.¹

AUTOR: Fabián Eduardo Motta Hurtado. ²

PALABRAS CLAVE: Medición de hidrocarburos, Medición de Corte de Agua, Incertidumbre, Repetibilidad.

DESCRIPCIÓN:

El Campo en Estudio es un campo maduro con mecanismo de producción de acuífero activo, cuyo corte de agua en la actualidad es en promedio del 96%. Por tal motivo es una necesidad tener una medición de corte de agua más precisa y exacta, pues cada vez mayor número de pozos se acercan al límite económico (98% de corte de agua).

El propósito de este trabajo de grado consiste en diseñar e implementar una estrategia para reducir la incertidumbre de la medición de corte de agua en los clúster A y B del Campo en Estudio utilizando tecnologías de medición en tiempo real y estándares internacionales con el objetivo de tener información más precisa y exacta para toma de decisiones de control de producción tales como activación y cierre de pozos para optimizar producción y rentabilidad, identificar variaciones de corte de agua en los pozos de forma oportuna para evitar saturaciones de las facilidades de tratamiento de agua de superficie, mejorar la precisión la toma de decisiones de abandono de pozos y por ende evitar pérdida de reservas.

La implementación de la estrategia logró la reducción de la incertidumbre de medición de corte de agua para las pruebas de pozo 7.7 veces en el clúster A y 3.6 veces en el clúster B con respecto al método tradicional de muestreo puntual y análisis de laboratorio, demostrando así el éxito de la prueba piloto.

¹ Tesis de grado

² Facultad de Ingenierías Físico-Químicas. Escuela de Ingeniería de Petróleos. Maestría en Ingeniería de Petróleos y Gas Director(a): Fredy Omar Niño Flórez

ABSTRACT

TITLE: Improvement of the water cut measurement process for well production tests by applying real-time measurement technologies and international standards to reduce their uncertainty in cluster A and B of the Field in Study. ³

AUTHOR: Fabian Eduardo Motta Hurtado. ⁴

KEYWORDS: hydrocarbons measurement, water cut measurement, uncertainty, repeatability.

DESCRIPTION:

The field in study is a mature field with active aquifer production mechanism, whose current water cut is in average 96%. For this reason, it is necessary to have a more accurate water cut measurement because of an increasing number of wells are approaching the economic limit (98% water cut).

The purpose of this degree work is to design and implement a strategy to reduce the uncertainty of the water cut measurement in Clusters A and B of the Field in Study using real-time measurement technologies and international standards in order to have more accurate information for production control decisions such as activation and closure of wells to optimize production and profitability, identify water cut variations in the wells in a timely manner to avoid saturation of surface water treatment facilities , improve the precision of decision making of abandonment of wells and therefore avoid loss of reserves.

The implementation of the strategy achieved the reduction of the uncertainty of water cut measurement for the well tests 7.7 times in cluster A and 3.6 times in cluster B with respect to the traditional method of point sampling and laboratory analysis, thus demonstrating the success of the pilot test.

³ Degree work for a master

⁴ Physic-chemist Engineering Faculty, Petroleum Engineering School, Magister of Petroleum and Gas, Director: M.Sc. Fredy Omar Niño Flórez.

INTRODUCCIÓN

El Campo en Estudio es un campo maduro con mecanismo de producción de acuífero activo, ubicado en los llanos orientales colombianos, cuyo corte de agua en la actualidad es en promedio del 96%. Por tal motivo es una necesidad tener una medición de corte de agua más precisa y exacta, y en tiempo real, pues cada vez mayor número de pozos se acercan al límite económico (98% de corte de agua).

Actualmente la medición de corte de agua se realiza manualmente de forma rutinaria y puntual, de tal manera, poder tener información del corte de agua en tiempo real permitiría un entendimiento del comportamiento de los pozos con un grado mucho más alto de exactitud.

El propósito de este trabajo de grado consiste en reducir la incertidumbre de la medición de corte de agua del Campo en Estudio utilizando tecnologías de medición en tiempo real y estándares internacionales con el objetivo de tener mejor información para toma de decisiones de control de producción tales como activación y cierre de pozos para optimizar producción y rentabilidad, identificar variaciones de corte de agua en los pozos de forma oportuna para evitar saturaciones de las facilidades de tratamiento de agua de superficie, mejorar la precisión la toma de decisiones de abandono de pozos y por ende evitar pérdida de reservas.

Para lograr este objetivo, en primer lugar se realizará un diagnóstico del estado actual del proceso de medición de corte de agua y su incertidumbre asociada, en segundo lugar se validarán las recomendaciones de normas y estándares internacionales de medición que aplican en el proceso de muestreo puntual en cabeza de pozo, de análisis de laboratorio de muestras y liquidación de pruebas de producción de pozos, en tercer lugar se evaluará y analizarán las tecnologías de medición en tiempo real de corte de agua aplicables.

Utilizando los resultados de las actividades descritas anteriormente, por último se elaborará, implementará y evaluará una estrategia que permita la reducción de la incertidumbre de medición de corte de agua para las pruebas de pozo de los clúster A y B del Campo en Estudio.

1. CONTEXTO PROBLEMÁTICO

1.1 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

El Campo en Estudio es un campo maduro con mecanismo de producción de acuífero activo, ubicado en los llanos orientales colombianos, cuyo corte de agua en la actualidad es en promedio del 96%. Por tal motivo es una necesidad tener una medición de corte de agua más precisa y exacta, pues cada vez mayor número de pozos se acercan al límite económico (98% de corte de agua).

Debido a la alta variabilidad de corte de agua de sus pozos es necesario realizar al menos 300 pruebas de pozos al día (cubriendo aproximadamente la mitad de los pozos activos del campo) con el objetivo de tener controlado el factor de campo, teniendo así altos costos asociados a cantidad de muestreos y análisis de BSW.

Lo anterior podría traer como consecuencia tener desfases en el factor de campo por encima de la tolerancia máxima permitida por el Ministerio de Minas y Energía, impedir la maximización del valor en el activo al tener pozos operándolos por encima de su límite económico, dificultades en la correcta toma de decisiones de abandono de pozos y por ende pérdida de reservas.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo General

- ✓ Mejorar el proceso de medición del corte de agua en pruebas de producción de pozos aplicando tecnologías de medición en tiempo real y estándares internacionales para disminuir su incertidumbre en los clúster A y B del Campo en Estudio.

1.2.2 Objetivos Específicos

- ✓ Realizar un diagnóstico del estado actual del proceso de medición de corte de agua y su incertidumbre asociada.
- ✓ Validar las recomendaciones de normas y estándares internacionales de Medición que aplican en el proceso de muestreo puntual en cabeza de pozo, de análisis de laboratorio de muestras y liquidación de pruebas de producción de pozos.
- ✓ Analizar las tecnologías de medición en línea de corte de agua aplicables a los clúster A y B del Campo en Estudio a partir de pruebas piloto.
- ✓ Elaborar una estrategia que permita la mejora (reducción de la incertidumbre) de medición de corte de agua para las pruebas de pozo de los clúster A y B del Campo en Estudio con base en los resultados del diagnóstico, validación de estándares internacionales y pruebas piloto de tecnologías de medición en tiempo real.
- ✓ Implementar la estrategia que permite la mejora (reducción de la incertidumbre) de medición de corte de agua para las pruebas de pozo de los clúster A y B del Campo en Estudio.
- ✓ Evaluar los resultados de la implementación de la estrategia de medición de corte de agua para las pruebas de pozo de los clúster A y B del Campo en Estudio.

1.3 JUSTIFICACIÓN

A medida que los campos de petróleo en todo el mundo alcanzan una mayor madurez, los volúmenes de agua producida de los pozos van aumentando. El alto costo de producción del crudo, y en muchas áreas el alto costo del tratamiento y disposición del agua, hace que la minimización de los niveles de agua producida sea una prioridad. Esto sólo puede hacerse si los operadores tienen un conocimiento preciso y en tiempo real del corte de agua para cada pozo o grupo de pozos.

Históricamente en el mundo, las pruebas de pozo se han realizado manualmente de forma rutinaria y puntual. De tal manera, tener información en tiempo real permite un entendimiento del comportamiento de los pozos con un grado mucho más alto de exactitud.

El propósito de este trabajo de grado consiste en reducir la incertidumbre de la medición de corte de agua del Campo en Estudio utilizando tecnologías de medición en tiempo real y estándares internacionales con el objetivo de tener mejor información para toma de decisiones de control de producción tales como activación y cierre de pozos para optimizar producción y rentabilidad, identificar variaciones de corte de agua en los pozos de forma oportuna para evitar saturaciones de las facilidades de tratamiento de agua de superficie, mejorar la precisión la toma de decisiones de abandono de pozos y por ende evitar pérdida de reservas.

El presente trabajo de grado aporta recomendaciones de estándares internacionales que puedan reducir la incertidumbre del proceso de muestreo y análisis de laboratorio para medición de corte de agua. Permite evaluar y seleccionar una tecnología de medición de corte de agua en línea para crudo pesado que mejore la medición para Campo en Estudio y que permita detectar variaciones que con el método de muestreo tradicional no se podrían, y de esta

manera poder disminuir costos asociados a este proceso por la implementación de tecnologías de medición en tiempo real.

1.4 ALCANCE

Mejorar el proceso de medición del corte de agua para pruebas de producción de pozos aplicando tecnologías de medición en tiempo real mediante pruebas piloto de algunas tecnologías disponibles tales como absorción de infrarrojos, Coriolis, resonancia de microondas, etc., y los estándares internacionales que aseguran la medición y liquidación de pruebas de producción para disminuir su incertidumbre en los clúster A y B del Campo en Estudio.

2. MARCO DE REFERENCIA

2.1 ANTECEDENTES INVESTIGATIVOS

En una revisión de antecedentes investigativos, se encontró muy poca información de este tema en América, sin embargo en otros contextos geográficos se encontraron investigaciones que aportan significativamente a este trabajo de grado.

Jinjiang Xiao (2015) publicó un trabajo relacionado con la Determinación de la fracción del volumen de agua para la producción de aceite y agua con la velocidad de medición del sonido, cuyo objetivo fue presentar una técnica de medición de corte de agua en tiempo real usando la tecnología de velocidad del sonido, teniendo porcentajes de error de hasta 5%, analizando el impacto de la estratificación de fluidos en la medición y planteando opciones para asegurar una debida homogenización del fluido. Su principal conclusión fue que la medición en tiempo real de la producción de petróleo, gas y agua de un pozo es fundamental para optimizar la producción de pozos y mejorar la recuperación en el campo. Este trabajo aporta a la presente investigación lineamientos técnicos para aseguramiento de la medición de corte de agua en tiempo real.⁵

Muhammad Akram Karimi (2015), desarrolló el diseño de un sensor de corte de agua de microondas de bajo costo para optimizar el proceso de producción de aceite, cuyo objetivo fue desarrollar un sensor de corte de agua con tecnología de microondas que fuera de bajo costo. Su conclusión principal fue que la investigación aportó soluciones a la mayoría de los problemas en la detección de corte de agua

⁵ Xiao, Jinjiang. Determining Water Volume Fraction for Oil-Water Production with Speed of Sound Measurement. On line. 7th of May 2017. Available in: <http://www.saudiaramco.com/content/dam/Publications/Journal-of-Technology/Summer2015/JOT-Summer-2015-Art11.pdf>

proponiendo e implementando un innovador sensor no intrusivo y de bajo costo que cubre toda la gama de operaciones (0% - 100%). Este trabajo aporta a la presente investigación el análisis de diferentes tecnologías de corte de agua que podrían aplicarse potencialmente para optimizar el proceso de medición del Campo en Estudio.⁶

Court Sandau, Jevins Waddell and Remi Anthony Berthelet (2008), presentaron un nuevo enfoque a la medición del alto corte de agua en un campo de petróleo maduro, cuyo objetivo fue encontrar un método de medición de corte de agua con menor incertidumbre, mediante comparación entre el método volumétrico y gravimétrico. La conclusión principal fue que el método gravimétrico es cinco veces más exacto y entre 6 y 10 veces más preciso que el método volumétrico. Este trabajo aporta a la presente investigación la metodología de estimación de incertidumbre de la medición de corte de agua comparando dos métodos y la posibilidad de probar esta tecnología en los clúster de estudio.⁷

La consulta de los anteriores antecedentes, ratifica el valor de este trabajo de grado para la optimización de la producción de los campos mediante una buena medición de corte de agua para pruebas de pozo.

2.2 MARCO TEÓRICO – CONCEPTUAL

2.2.1 Principios de medición de corte de agua en la industria petrolera

⁶ Akram Karimi, Muhammad. Low cost and conformal microwave water-cut sensor for optimizing oil production process. Thuwal, Kingdom of Saudi Arabia, 2015, 87. Thesis for the Degree of Master of Science. King Abdullah University of Science and Technology.

⁷ Sandau , Court. Waddell, Jevins . Berthelet , Remi Anthony . Novel Approach To High Water Cut Measurement In A Mature Oil Field. On Line. 7th of May 2017. Available in: https://www.onepetro.org/conference-paper/SPE-117354-MS?sort=&start=0&q=spe+117354&from_year=&peer_reviewed=&published_between=&fromSearchResults=true&to_year=&rows=10#

El agua y el aceite difieren en algunas de sus propiedades, como la densidad, la conductividad eléctrica, el coeficiente de absorción para los rayos Infra Rojos y rayos gamma, y permitividad dieléctrica relativa.⁸ Los sensores de corte de agua miden cualquiera de las propiedades antes mencionadas de una mezcla de aceite / agua y la comparan con una curva de referencia (la cual se construye mediante un modelo matemático pre establecido ajustado a las condiciones del fluido a medir mediante el proceso de calibración), para indicar un corte de agua desconocido. Algunas de las principales tecnologías que actualmente se emplean en la detección de corte de agua en la industria petrolera se enumeran a continuación en la Tabla 1:

Tabla 1: Principales tecnologías de medición de corte de agua en la industria petrolera.

Densidad	Coefficiente de absorción	Permitividad eléctrica relativa
<ul style="list-style-type: none"> Efecto Coriolis 	<ul style="list-style-type: none"> Absorción de Infra Rojos Absorción de Rayos Gamma 	<ul style="list-style-type: none"> Capacitancia Resonancia de Microondas Transmisiometría de dominio de tiempo

Fuente: Akram Karimi, Muhammad. Low cost and conformal microwave water-cut sensor for optimizing oil production process. Thuwal, Kingdom of Saudi Arabia, 2015, 87. Thesis for the Degree of Master of Science. King Abdullah University of Science and Technology.

Los criterios para seleccionar la tecnología de medición incluyen la gama de sensores disponibles en el mercado, los parámetros del proceso, la precisión esperada, la especificación de la tubería y condiciones de instalación, los requisitos de mantenimiento y el precio. Los enfoques de diseño varían entre fabricantes y

⁸ Akram Karimi, Muhammad. Low cost and conformal microwave water-cut sensor for optimizing oil production process. Thuwal, Kingdom of Saudi Arabia, 2015, 87. Thesis for the Degree of Master of Science. King Abdullah University of Science and Technology. Pag 19.

tecnologías. Seleccionando el fabricante óptimo y la tecnología de medición el usuario debe ser consciente de sus parámetros de aplicación.⁹

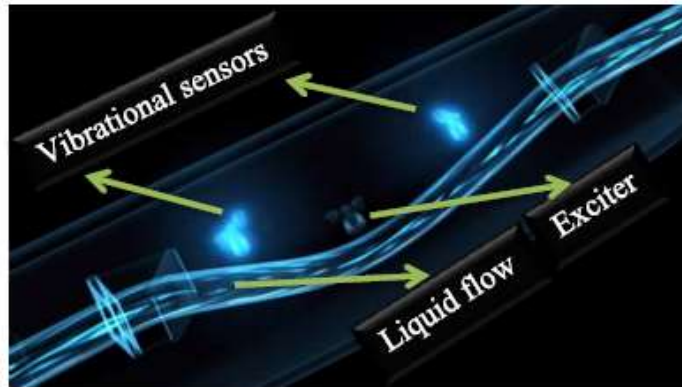
A continuación se explicarán en detalle el principio de funcionamiento de algunas de las tecnologías:

2.2.2 Principio Coriolis Debido a los diferentes elementos constitutivos del agua (oxígeno e hidrógeno) e hidrocarburos (carbono e hidrógeno), estos fluidos tienen diferentes densidades. El agua destilada tiene una densidad de $\approx 1000 \text{ kg / m}^3$; Dependiendo del tipo de petróleo crudo, tiene una densidad en el intervalo de 780 kg / m^3 (que contiene una mayor proporción de hidrocarburos más ligeros, como la gasolina) a 850 kg / m^3 (que contiene una mayor proporción de hidrocarburos más pesados, como la parafina cera).

El principio que gobierna de este método de medir el contenido de agua del aceite es el "efecto Coriolis", en el cual un tubo lleno de líquido es excitado mecánicamente utilizando una bobina impulsora, haciéndolo vibrar, y las bobinas sensoras instalados a cada extremo de los tubos detectan la frecuencia de oscilación (Ilustración 1) que es inversamente proporcional a la densidad del líquido dentro del tubo. El tubo vibra con una frecuencia de oscilación máxima cuando el crudo puro (menor densidad) pasa a través del tubo y con una frecuencia mínima cuando fluye agua (densidad más alta). Diferentes cortes de agua hacen que los tubos oscilen con frecuencias entre estos dos extremos, y el porcentaje relativo se determina usando esta frecuencia de oscilación.

⁹ ZelenTech, "How to select a watercut monitor," ZelenTech, 7 November 2011. [Online]. Available: <http://www.zelentech.co/blog/posts/how-to-select-a-watercut-monitor/>.

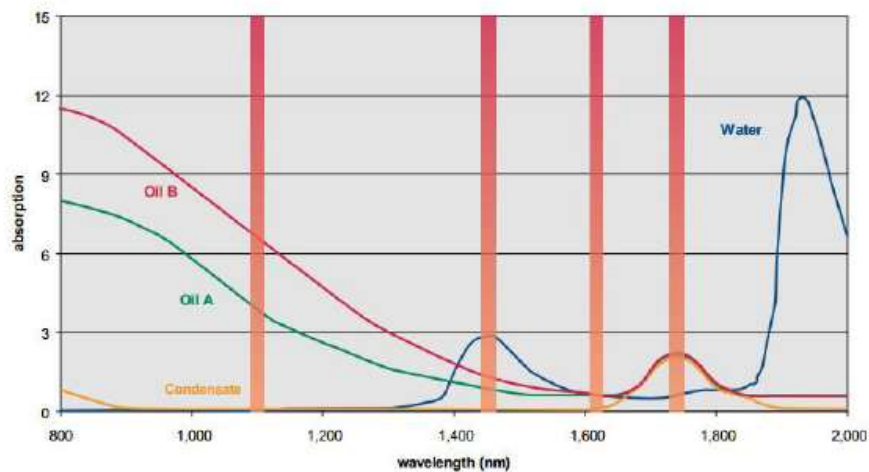
Ilustración 1: Tecnología Tipo Coriolis



Fuente: Akram Karimi, Muhammad. Low cost and conformal microwave water-cut sensor for optimizing oil production process. Thuwal, Kingdom of Saudi Arabia, 2015, 87. Thesis for the Degree of Master of Science. King Abdullah University of Science and Technology. Pag 20.

2.2.3 Absorción de rayos infra Rojos La óptica también proporciona un método para medir el contenido de agua en el petróleo crudo, pasando cerca de rayos IR a través de una mezcla de agua y aceite y observando la absorción, difracción y reflexión (Ilustración 2).

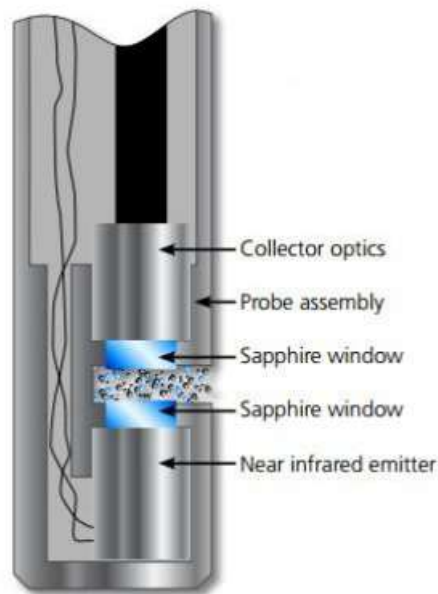
Ilustración 2: Principio de funcionamiento Absorción de rayos infra rojos



Fuente: Weatherford, "Red Eye 2G Water-Cut Meter," [Online]. Available: <http://www.weatherford.com/doc/wft096551>.

En la Ilustración 2, el agua absorbe más energía a longitudes de onda más altas, en contraste con los aceites, que absorben energía a longitudes de onda relativamente más pequeñas. Las diferencias en las propiedades de absorción de aceite y agua se explotan en sensores de corte de agua basados en espectroscopia de rayos Infra Rojos, donde cerca de las ondas IR inciden desde un extremo del tubo y son recibidas en el otro extremo después de pasar a través de la mezcla de aceite y agua. Esta tecnología es exacta sólo para WC altos y ofrece menos resolución en cortes de agua bajos. Además, estos tipos de sensores son extremadamente caros, debido al uso de una fuente de IR que requiere una ventana protectora especial libre de rasguños usualmente hecha de un material costoso, tal como zafiro (Ilustración 3).

Ilustración 3: Principio de funcionamiento Absorción de rayos infra rojos



Fuente: Weatherford, "Red Eye 2G Water-Cut Meter," [Online]. Available: <http://www.weatherford.com/doc/wft096551>.

La medición espectroscópica tiene varias ventajas cuando se utiliza para la medición del corte de agua. En primer lugar tiene la capacidad de medir en toda la gama de corte de agua. Contrariamente a los dispositivos capacitivos, el porcentaje

de error disminuye en realidad a medida que aumenta el corte de agua. La precisión de la tecnología en el extremo superior de la gama de corte de agua lo separa de otras tecnologías competitivas. La segunda gran ventaja, sólo disponible con esta tecnología, es que no se ve afectada por cambios en la densidad, la salinidad y el gas arrastrado.

Sin embargo, la principal desventaja de los productos de corte de agua a base de espectroscopia es que pierden la resolución y la precisión en los intervalos de corte más bajos. Esto limita su utilidad en aplicaciones convencionales de rango bajo. Las mediciones basadas en espectroscopia no tienen un buen rendimiento en sitios que tienen rangos de corte de 0 a 3% de agua, por ejemplo aplicaciones LACT. También el hecho de que estos dispositivos están equipados con ranuras muy estrechas (pocos mm) donde se transmite la luz infrarroja. Siempre se puede cuestionar si estas ranuras ven un representante del flujo total, especialmente para aplicaciones de crudo pesado. Además, la sección de medición se vuelve muy propensa a la obstrucción por cera o desechos. El desgaste y el rasguño ocurrirán en las lentes si el aceite contiene arena u otras partículas abrasivas, creando un lazo interminable de reemplazos del ojo del sensor.¹⁰

2.2.4 Absorción de Rayos Gamma Las diferentes fases en el flujo multifásico (aceite, agua y gas) también se pueden caracterizar en términos de su coeficiente de absorción lineal o coeficiente de absorción de masa para los rayos gamma. Materiales densos (por ejemplo, agua) absorben una mayor cantidad de rayos gamma en comparación con materiales con una densidad más baja (por ejemplo, petróleo crudo y gas). Los rayos gamma rectificados de una fuente en un extremo de una tubería son detectados por un receptor en el otro extremo de la tubería. La absorción de los rayos gamma, que pasa a lo largo de una línea, es una

¹⁰ ZelenTech, "How to select a watercut monitor," ZelenTech, 7 November 2011. [Online]. Available: <http://www.zelentech.co/blog/posts/how-to-select-a-watercut-monitor/>.

indicación de la densidad media de la mezcla a lo largo de esa línea¹¹. Dado que el agua y el aceite difieren en sus densidades, la absorción de rayos gamma es indicativa del corte de agua.

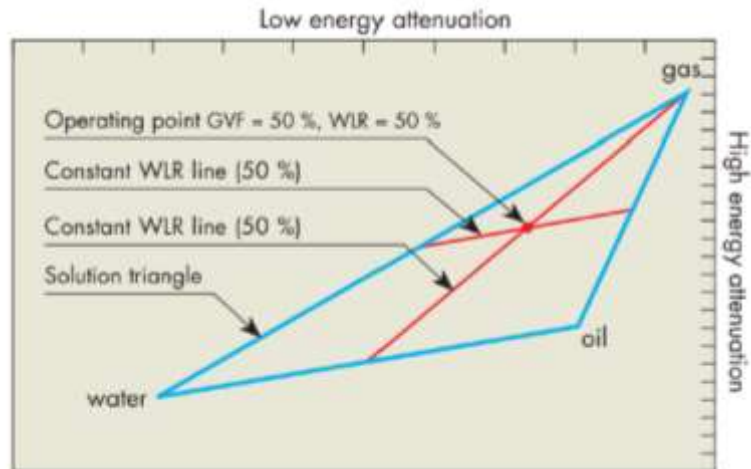
La proporción de agua en aceite, se puede medir usando muchos métodos, pero el principio de absorción de rayos gamma se utiliza especialmente para la medición precisa de la tercera fase, es decir, gas. Este principio se utiliza porque la energía gamma absorbida por cualquier material depende no sólo de la densidad del material, sino también de la energía absoluta que pasa a través de ella. Por lo tanto, los rayos gamma de energía dual pueden dar dos respuestas de absorción independientes, a partir de las cuales se pueden extraer los porcentajes relativos de las fases de aceite, agua y gas. Las respuestas de absorción de rayos gamma para aceite, agua y gas se registran como parte de la calibración. El triángulo formado en el proceso de calibración se puede utilizar posteriormente para detectar cualquier posible combinación de agua, petróleo y gas. Un triángulo de calibración representativo de la ingeniería de Framo¹² se muestra en la Ilustración 4. Cualquier punto dentro del triángulo azul representa una combinación posible de las fracciones de fase de aceite, agua y gas.¹³

11 I. M. Babelli, "IN SEARCH OF AN IDEAL MULTIPHASE FLOW METER FOR THE OIL INDUSTRY," ARABIAN JOURNAL FOR SCIENCE AND ENGINEERING, 2002.

12 F. Engineering, 2003. [Online]. Available: <http://imistorage.blob.core.windows.net/imidocs/99123p001%20framo%20multiphase%20flowmeters%20-%20phaseswatcher%20vx.pdf>.

13 Akram Karimi, Muhammad. Low cost and conformal microwave water-cut sensor for optimizing oil production process. Thuwal, Kingdom of Saudi Arabia, 2015, 87. Thesis for the Degree of Master of Science. King Abdullah University of Science and Technology. Pag 23.

Ilustración 4: Tecnología Absorción de rayos gamma.



Fuente: F. Engineering, 2003. [Online]. Available: <http://imistorage.blob.core.windows.net/imidocs/99123p001%20framo%20multiphase%20flowmeter%20-%20phasewatcher%20vx.pdf>.

Muchos Medidores Multifásicos (MPFMs), como los de CSIRO, Schlumberger VX, Framo, Haimo, ICC Mixmeter y Daniel MEGRA hacen uso de la doble energía de la técnica de absorción de rayos gamma. El inconveniente más significativo de los sensores de corte de agua basados en absorción de rayos gamma se debe al hecho de que utilizan una fuente de energía radiactiva, que es peligrosa para la salud humana. Por lo tanto, se debe tener especial cuidado al manejar estos sensores.¹⁴

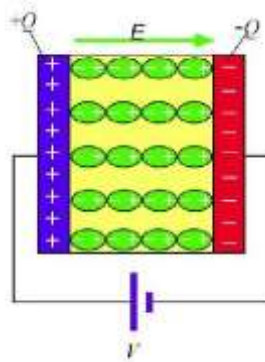
¹⁴ Akram Karimi, Muhammad. Low cost and conformal microwave water-cut sensor for optimizing oil production process. Thuwal, Kingdom of Saudi Arabia, 2015, 87. Thesis for the Degree of Master of Science. King Abdullah University of Science and Technology.

2.2.5 Constante dieléctrica Los sensores de corte de agua más ampliamente estudiados se basan en la detección de la diferencia en la constante dieléctrica de las mezclas de aceite y agua.

La permitividad relativa, también conocida como constante dieléctrica, de cualquier medio dieléctrico se define como la relación de la capacidad de un condensador para almacenar carga con ese medio como dieléctrico, a la carga almacenada cuando se utiliza un vacío como medio dieléctrico.

Cuando un material dieléctrico se coloca en un campo eléctrico, se polariza. Esta polarización aparece como un momento dipolo (Ilustración 5); esto hace que se produzca el almacenamiento de energía potencial eléctrica dentro del medio. La polarización de cualquier medio dieléctrico depende de la no simetría de sus moléculas y de la afinidad electrónica relativa de los átomos que constituyen las moléculas del medio dieléctrico.

Ilustración 5: Polarización de un medio dieléctrico colocado dentro del campo eléctrico



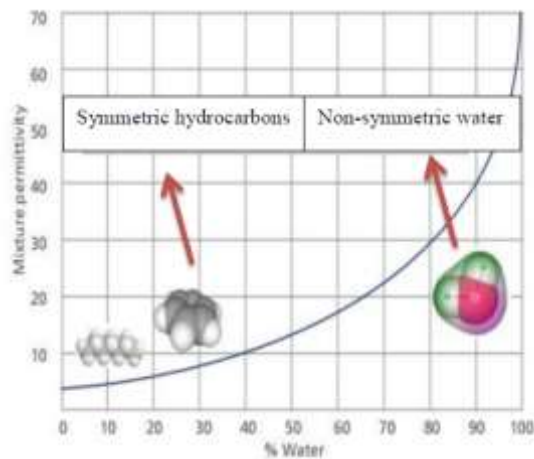
Fuente: Akram Karimi, Muhammad. Low cost and conformal microwave water-cut sensor for optimizing oil production process. Thuwal, Kingdom of Saudi Arabia, 2015, 87. Thesis for the Degree of Master of Science. King Abdullah University of Science and Technology. Pag 24.

En las moléculas de agua, los átomos de oxígeno tienen una afinidad electrónica más alta que los átomos de hidrógeno, debido a la estructura molecular no simétrica del agua. Por lo tanto, una nube de electrones es atraída en mayor grado al oxígeno

que al hidrógeno, lo que lleva a su alta capacidad de alinearse con un campo eléctrico aplicado (lo que da como resultado una permitividad relativa mayor, generalmente en el rango de 78 - 80). Por el contrario, los hidrocarburos (compuestos de hidrógeno y carbono) presentes en el petróleo crudo muestran una estructura relativamente simétrica y tienen una menor tendencia a alinearse con un campo eléctrico aplicado (lo que resulta en una baja permitividad eléctrica relativa generalmente en el rango de 2.2 - 2.6)

En consecuencia, al aumentar el contenido de agua en el petróleo crudo, aumenta la permitividad relativa de la mezcla. Sin embargo, la permitividad de la mezcla de aceite / agua en diferentes WC depende del tamaño de partícula de la fase dispersa en la fase continua. La Ilustración 6 representa un caso particular publicado por Roxar.

Ilustración 6: Cambio en la permitividad relativa de la mezcla de aceite / agua en diferentes cortes de agua



Fuente: Emerson Process Management, "Roxar Watercut meter," [Online]. Available: <http://www2.emersonprocess.com/siteadmincenter/PM%20Roxar%20Documents/Roxar%20Watercut%20meter%20Brochure.pdf>.

Las siguientes tres tecnologías prevalentes detectan el cambio en la constante dieléctrica de una mezcla de aceite / agua para la detección de corte de agua:

- Sensor basado en capacitancia
- Sensor basado en resonancia de microondas; y
- Sensor basado en Transmisimetría de dominio de tiempo (TDT)

2.2.6 Resonancia de Microondas El sustrato (con una constante dieléctrica de ϵ_r y una tangente de pérdida de $\tan\delta$) define la velocidad de las microondas que pasan a través de ella. Dado que las microondas se hacen pasar a través de un medio dieléctrico mediante ciclos alternos de carga y descarga, los sustratos con una alta capacidad de almacenamiento (es decir, de ϵ_r alto) dificultan el cambio de la polaridad del campo Eléctrico, provocando por lo tanto una reducción de la velocidad del microondas, como se muestra por la Ecuación 1.

Ecuación 1

$$v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_{eff}}}$$

Donde:

c : Velocidad de la luz.

ϵ_{eff} : Constante dieléctrica efectiva.

El fenómeno de resonancia de microondas se basa en la superposición de dos ondas de desplazamiento opuesto que hacen que el patrón de ondas estacionarias aparezca a diferentes frecuencias dependiendo de la velocidad de las microondas.

Por lo tanto, la frecuencia de resonancia del resonador de microondas está unida a la permitividad eléctrica relativa (ϵ_r) del sustrato. Como se explicó anteriormente, el aceite y el agua tienen diferentes valores ϵ_r ; Por lo tanto, el ϵ_r de una mezcla de aceite / agua depende del corte de agua. Por lo tanto, la frecuencia de resonancia

del resonador de microondas corresponde al corte de agua de una mezcla de aceite / agua.¹⁵

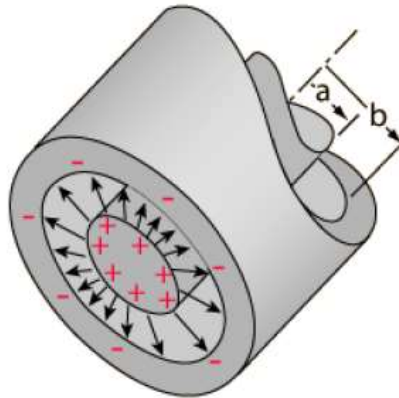
2.2.7 Capacitancia La detección capacitiva para medir el corte de agua se ha utilizado durante aproximadamente 50 años, y se considera una solución relativamente simple y barata en comparación con otros tipos de sensores corte de agua. La capacitancia de un condensador es una función de la permitividad relativa del medio intercalado entre sus electrodos. Una mezcla de aceite / agua actúa como un medio dieléctrico para estos sensores. Dependiendo del material de la tubería (conductor o no conductor), estos sensores WC se informaron en dos tipos de configuraciones:

- Sensor de corte de agua basado en condensador coaxial (para tuberías metálicas); y
- Electrodos de tubo conforme a un sensor WC (para tubos dieléctricos).

Los sensores corte de agua basados en condensadores coaxiales consisten en dos electrodos concéntricos de metal (una varilla metálica se coloca dentro de la tubería con la ayuda de un soporte mecánico para actuar como un electrodo, y la superficie metálica de la tubería sirve como el segundo electrodo), entre los cuales fluye el mezcla de aceite y agua. El cambio en la capacitancia a través de los electrodos del condensador se mide y se relaciona con el WC. La configuración típica de los sensores WC basados en condensadores cilíndricos coaxiales se muestra en la Figura 7.

¹⁵ Akram Karimi, Muhammad. Low cost and conformal microwave water-cut sensor for optimizing oil production process. Thuwal, Kingdom of Saudi Arabia, 2015, 87. Thesis for the Degree of Master of Science. King Abdullah University of Science and Technology. Pag 28.

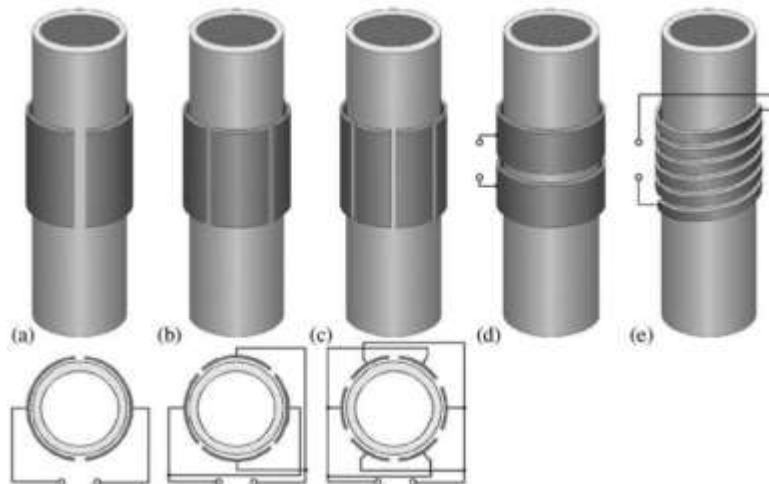
Ilustración 7: Configuración del sensor de WC capacitivo basado en electrodo coaxial típico.



Fuente: ZelenTech, "How to select a watercut monitor," ZelenTech, 7 November 2011. [Online]. Available: <http://www.zelentech.co/blog/posts/how-to-select-a-watercut-monitor/>.

La detección capacitiva del corte de agua también puede realizarse envolviendo dos electrodos en forma de arco alrededor de la circunferencia externa de un tubo dieléctrico. Esta configuración (Ilustración 8) ha sido ampliamente estudiada porque ofrece un medio no intrusivo para detectar el corte de agua.

Ilustración 8: Posibles configuraciones de sensores capacitivos conformales para mediciones de corte de agua. (a) Un par de tiras semicilíndricas; (b) dos pares de tiras semicilíndricas, (c) tres pares de tiras semicilíndricas, (d) dos electrodos anulares, y (e) electrodos de doble hélice



Fuente: Akram Karimi, Muhammad. Low cost and conformal microwave water-cut sensor for optimizing oil production process. Thuwal, Kingdom of Saudi Arabia, 2015, 87. Thesis for the Degree of Master of Science. King Abdullah University of Science and Technology. Pag 27.

La frecuencia de excitación utilizada para medir la capacitancia juega un papel importante en la definición del rango de sensores de corte de agua capacitivos. Por lo tanto, la detección capacitiva se puede categorizar ampliamente en función de la frecuencia de excitación de las mediciones. Se sabe que el método de medición de baja frecuencia de excitación (en el rango de kHz) sufre el efecto de cortocircuito entre los electrodos del condensador en presencia de un medio conductor (es decir, en los casos de un alto corte de agua cuando el agua es la fase continua); por lo tanto, este método no es aplicable para mediciones de corte de agua confiables por encima de 70%¹⁶. Se ha demostrado que la sensibilidad de los sensores capacitivos se puede aumentar si se utiliza una frecuencia de excitación mayor a 1 MHz y se minimiza el efecto de protección (responsable de la disminución de la sensibilidad en cortes de agua elevados)¹⁷. Esto ocurre cuando el comportamiento dieléctrico del agua se vuelve comparable a su comportamiento conductivo a una frecuencia más alta, y el efecto de cortocircuito entre los electrodos del condensador desaparece. Como resultado de este hallazgo, se ha utilizado una frecuencia de excitación alta para aumentar el rango de medición de tales sensores.¹⁸

La configuración capacitiva coaxial se ha comercializado con éxito debido a su capacidad para implementarse en tuberías metálicas. Muchos fabricantes, como ZelenTech, EssiFlo, DeltaC, Nuflo y DerexelBrook utilizan actualmente el principio de capacitancia coaxial para medir corte de agua. Con los avances recientes en materiales dieléctricos (por ejemplo, PEEK) que pueden soportar altas presiones y

¹⁶ E. Hammer, "Capacitance transducers for non-intrusive measurement of water in crude oil," *Flow Measurement and Instrumentation*, vol. 1, no. 1, pp. 51-58, 1989.

¹⁷ M. Demori, "A capacitive sensor system for the analysis of two-phase flows of oil and conductive water," *Sensors and Actuators*, 2010.

¹⁸ M. A. Abouelwafa and E. M. Kendall, "The Use of Capacitance Sensors for Phase Percentage Determination in Multiphase Pipelines," *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 29, no. 1, pp. 24-27, 1980.

altas temperaturas, la configuración de capacitancia conforme a la tubería también se ha vuelto atractiva ya que es capaz de detectar no intrusivamente el corte de agua.

2.3 MARCO PRÁCTICO

En la actualidad el Campo en Estudio tiene una producción de crudo del orden de 117 KBOPD y 3.5 MBWPD de agua, que corresponde a un corte de agua promedio del orden de 96%.

Cuenta con 612 pozos activos distribuidos en 184 clusters, los cuales se encuentran ubicados estratégicamente en el área de desarrollo del campo.

A estos pozos se le establece un cronograma de pruebas específico para cada uno, con el cual se puede validar cual es el potencial de producción que está aportando de forma integrada al balance general del activo, a su vez el realizar estas pruebas nos permite cumplir con la normatividad legal necesaria para la operación y desarrollo del yacimiento.

A continuación en la Ilustración 9 se muestra el histórico de producción de crudo versus producción de agua:

Ilustración 9: Histórico de producción del campo en estudio.



3. CAPÍTULO 1: DIAGNÓSTICO PRELIMINAR DE LA MEDICIÓN DE CORTE DE AGUA

En este capítulo se presentará el diagnóstico del estado actual de la medición de corte de agua en el Campo en Estudio con respecto a los estándares internacionales API MPMS y buenas prácticas en la industria, también todas las variables que afectan la incertidumbre de la medición tales como condiciones de muestreo, análisis de laboratorio y liquidación de pruebas de producción.

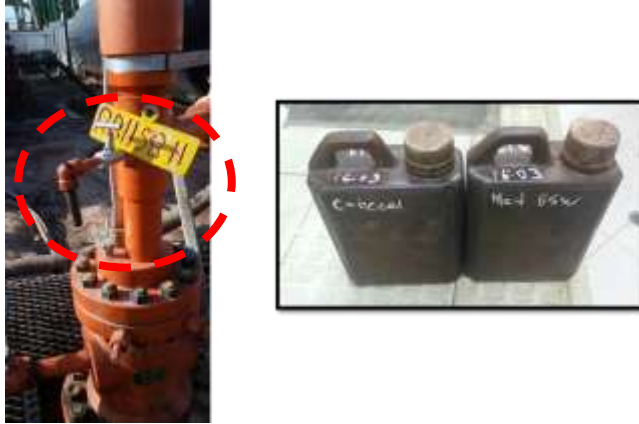
3.1 CONDICIONES DE MUESTREO

3.1.1 Muestreo manual

En el Campo en Estudio, actualmente se toman entre 400 – 450 muestras diarias para pruebas de producción de los pozos, las cuales son analizadas en 3 laboratorios para la determinación de Corte de Agua.

El proceso de muestreo lo realizan aproximadamente 9 recorredores de campo por turnos de 12 horas, los cuales toman la muestra en recipientes de medio galón directamente de la cabeza de los pozos mediante un sistema de toma muestra manual tal como se puede observar en la Ilustración 10:

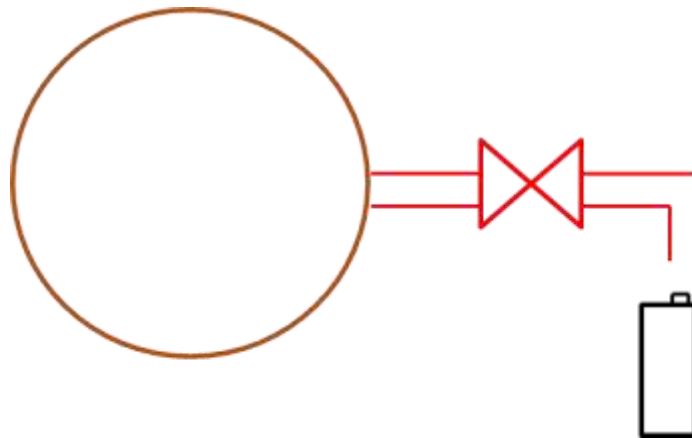
Ilustración 10: Proceso de toma de muestras cabeza de pozo.



Se pudo evidenciar que el proceso de muestreo se realiza de acuerdo a las mejores prácticas enfocado en la conservación de la integridad de la muestra, buen etiquetado y rotulado para garantizar la trazabilidad y asegurando la cantidad necesaria para realizar el análisis de laboratorio.

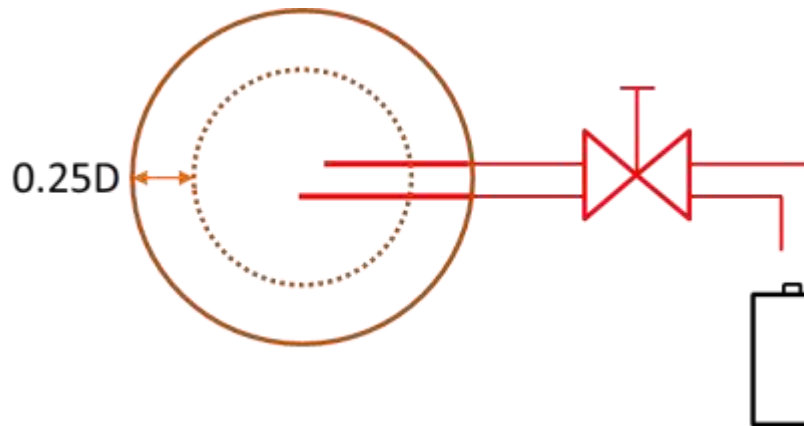
3.1.2 Toma Muestras en Cabeza de Pozo Realizando el diagnóstico a la conformidad de los toma muestras en el Campo en Estudio, se identificó que no cuentan con una sonda apropiada que permita la toma de la muestra en la región adecuada o región de muestreo que corresponde del 25% al 75% del diámetro interno de la tubería, la muestra actualmente se está tomando en el borde interno de la tubería tal como se muestra en la Ilustración 11:

Ilustración 11: Condición de muestreo actual en el campo de estudio.



De tal forma se identifica la primera condición sub estándar, pues la norma internacional API MPMS Cap. 8.2 recomienda que la sonda de muestreo esté ubicada entre el 25% - 75% del diámetro interior de la tubería, tal como se muestra a continuación en la Ilustración 12:

Ilustración 12: Toma muestras recomendado por API MPMS Cap. 8.2.



3.2 ANÁLISIS DE LABORATORIO

Los análisis de laboratorio para determinar el corte de agua en el Campo de Estudio se realizan en 3 laboratorios industriales, 2 ubicados en las facilidades de producción y 1 laboratorio satélite.

Para el diagnóstico, se realizó el acompañamiento del proceso de análisis de laboratorio, desde la recepción de la muestra, análisis de laboratorio (Corte de agua y BSW), registro y emisión de resultados.

A continuación, en la Ilustración 13 se muestra el montaje típico utilizado en el Campo en Estudio para el análisis de laboratorio:

Ilustración 13: Análisis de Laboratorio para corte de Agua en el Campo en Estudio.



Realizando el acompañamiento, se evidenció un correcto aseguramiento de la trazabilidad de la información, tratamiento y buen manejo de la muestra para el análisis. El análisis de laboratorio se está realizando por personal entrenado y competente, evidenciando un registro adecuado de resultados en una base de datos que asegura la integridad del dato de corte de agua desde el laboratorio hasta el personal de control de producción, quienes liquidan las pruebas de producción de los pozos.

De tal manera se puede concluir que el análisis de corte de agua en laboratorio de Campo Rubiales está conforme a mejores prácticas en la industria y al estándar ERCB Directive 46 Apéndice C (Procedimiento de Corte de Agua) y para el BSW de acuerdo al estándar ASTM 4007 (BSW por centrífuga).

3.3 LIQUIDACIÓN DE PRUEBAS DE POZO

La liquidación de las pruebas de pozo requiere de dos datos de entrada fundamentales, la cantidad (Volumen de fluido del pozo) y la calidad (el corte de agua), con estas dos variables es posible determinar el volumen de crudo y agua producidos en un pozo determinado.

Actualmente, las pruebas de producción de los pozos se liquidan tomando el valor de volumen total de la prueba que arroja el medidor de flujo tipo Coriolis instalado en el manifold de prueba de cada clúster, y el dato de corte de agua del análisis de laboratorio de la muestra puntual de cada pozo. A continuación en la Ilustración 14 se muestra la ecuación de liquidación de pruebas de producción usado actualmente:

Ilustración 14: Modelo matemático de liquidación de pruebas de producción.



$$V_{Crudo} = IV_{Coriolis} * MF * (1 - Corte\ Agua\ pozo)$$

$$V_{Agua} = IV_{Coriolis} * MF * (Corte\ de\ Agua\ pozo)$$

Donde:

V_{Crudo} : Volumen de crudo producido por el pozo en análisis (Bbls).

V_{Agua} : Volumen de agua producida por el pozo en análisis (Bbls).

$IV_{Coriolis}$: Medición de cantidad en barriles de la prueba del pozo (Bbls).

MF: Factor de corrección volumétrica de calibración del pozo.

Corte de Agua: Medición de corte de agua de laboratorio.

Actualmente en el campo de estudio se está liquidando las pruebas de producción de los pozos combinando variables a diferentes condiciones, es decir, a condiciones de proceso de presión y temperatura en cabeza de pozo (Medición de cantidad), y variables a condiciones de presión y temperatura de laboratorio (Medición de calidad).

De tal forma se identifica la segunda condición sub estándar, pues en la norma internacional API MPMS Cap. 20.1 (Production Allocation Measurement), establece que para determinar apropiadamente la proporción de agua y crudo en una muestra para liquidación de pruebas de producción, el corte de agua debe ser determinado a condiciones de medición.

A continuación se explicará en detalle el efecto de la presión y temperatura en la medición de corte de agua:

3.3.1 Efecto de Temperatura en Corte de Agua

- El agua y el crudo tienen diferentes coeficientes de expansión térmica.

Por ejemplo: Si una muestra tiene igual volumen de crudo y de agua a 60°F y es calentada. El crudo se expande más que el agua, por ende el corte de agua va ser menor.

- Para Cortes de agua altos, el efecto de temperatura es significativo, pues la mínima expansión térmica del crudo afectaría la exactitud de la medida.

En el caso del Campo en Estudio la medida de corte de agua se podría ver afectada en hasta +/- 1.25%, dado que el promedio de temperatura en cabeza de pozo está entre 120-150°F mientras que la temperatura del laboratorio se encuentra alrededor de 70°F.

3.3.2 Efecto de la Presión en el corte de agua

- En el punto de medición de pruebas de pozo, el hidrocarburo está normalmente en condiciones cercanas a la presión de burbuja. Cuando este hidrocarburo es muestreado se genera un delta de Presión, los componentes livianos se evaporan, causando una reducción en el volumen de la muestra. Generando un % de corte de agua mayor a condiciones de laboratorio.

En el caso del campo en estudio, la medida de corte de agua se podría ver afectada en hasta $\pm 0.75\%$, dadas las propiedades fisicoquímicas del crudo producido.

De tal manera, se podría tener un error en el corte de agua de hasta $\pm 2\%$ por causa de los efectos en las variaciones por Temperatura y Presión, de tal manera es fundamental, para reducir la incertidumbre de la medición, que sean tenidas en cuenta y corregidas para la liquidación de las pruebas de producción.

4. CAPÍTULO 2: RECOMIENDACIONES DE NORMAS Y ESTÁNDARES INTERNACIONALES DE MEDICIÓN

Adicional al diagnóstico inicial, es necesario realizar la revisión y validación de los estándares internacionales de medición de hidrocarburos que aplican para la medición de corte de agua del Campo en Estudio, con el objetivo de disminuir cualquier fuente de incertidumbre a la medición adicional que no se haya identificado en la fase de diagnóstico, apalancado en las mejores prácticas y estándares internacionales tales como API MPMS Cap. 8.2 Procedimiento Estándar para Muestreo Automático de Petróleo Líquido y Productos de Petróleo y API MPMS Cap. 20.1 Allocation Measurement.

4.1 BUENA DISPERSIÓN DE LA MUESTRA

Con el objetivo de asegurar una buena dispersión del fluido a muestrear, el API MPMS Cap. 8.2, en la Tabla 2, proporciona una guía sobre las velocidades mínimas obtenidas contra los elementos para mezclado, en diámetros de tubería de 5 cm (2 pulgadas) y mayores. El acondicionamiento de flujo se puede lograr con válvulas reductoras de presión, múltiples de medición, longitudes de tubería con diámetro reducido o accesorios de tubería (válvulas, codos, tees, tubos o circuitos de expansión).

Si la velocidad de flujo en el lugar de la sonda del toma muestra disminuye por debajo de los niveles mínimos detallados en la Tabla 2, serán requeridos medios adicionales para proveer un adecuado acondicionamiento de flujo tales como mezcladores motorizados o mezcladores estáticos. Deberían también considerarse los efectos de la viscosidad, densidad y contenido de agua, así como la posición relativa de los elementos para mezclado y la sonda de muestreo.

Tabla 2: Guía general de velocidades de flujo mínimas versus elementos de mezclado.

Elemento para mezclado		Velocidad Mínima en Tubería, metros por segundo								
Tubería		0	0.305	0.61	0.91	1.22	1.52	1.83	2.13	2.44
Mezclado motorizado	Horizontal o Vertical	Adecuada a cualquier velocidad								
Mezclado estático	Vertical	Estratificado	No predecible	Adecuadamente disperso						
Mezclado estático	Horizontal	Estratificado	No predecible	Adecuadamente disperso						
Elementos de Tubería	Vertical	Estratificado	No predecible	Adecuadamente disperso						
Elementos de Tubería	Horizontal	Estratificado	No predecible			Adecuadamente disperso				
Ninguno	Horizontal o Vertical	Estratificado o no predecible								
		0	1	2	3	4	5	6	7	8
		Velocidad Mínima en Tubería, pies por segundo								

Fuente: API MPMS Cap.8.2. Procedimiento Estándar para Muestreo Automático de Petróleo Líquido. Washington D.C., 1995, Página 6.

Para el caso del Campo en Estudio, en los toma muestras ubicados en cabeza de pozo que están instalados en orientación vertical con elementos de tubería para mezclado, el criterio de validación de velocidad mínima requerida para una buena dispersión de la muestra es de 1.3 metros por segundo. En los toma muestras ubicados en el manifold de prueba, que están instalados en orientación horizontal con mezclador estático, el criterio de validación de velocidad de flujo sería 1.1 metros por segundo.

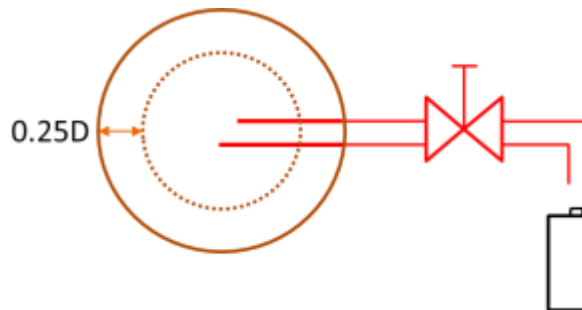
4.2 ÁREA DE MUESTREO

Con el objetivo de asegurar una muestra representativa del fluido, el API MPMS Cap. 8.2 recomienda que el área de muestreo sea aproximadamente el centro medio de la tubería (entre el 25% al 75% del diámetro de la tubería) como se muestra en la Ilustración 15¹⁹, adicionalmente establece que:

¹⁹ API MPMS Cap.8.2. Procedimiento Estándar para Muestreo Automático de Petróleo Líquido. Washington D.C., 1995, 8.

- La abertura de la sonda debe estar orientada corriente arriba y el cuerpo externo de la sonda debería ser etiquetado con la dirección del flujo para verificar que la sonda está instalada correctamente.
- La sonda debe colocarse en la zona donde se obtenga un mezclado suficiente que origine un adecuado acondicionamiento de flujo. Esta zona es generalmente de tres a diez diámetros corriente abajo de los elementos de la tubería, 0.5 a 4 diámetros de los mezcladores estáticos y tres a diez diámetros de mezcladores motorizados. Cuando los mezcladores estáticos o motorizados son utilizados debería consultarse al fabricante del aparato para conocer la ubicación óptima de la sonda.

Ilustración 15: Área de muestreo recomendada por API MPMS Cap. 8.2.



4.3 DISEÑO DE LA SONDA DEL TOMA MUESTRAS

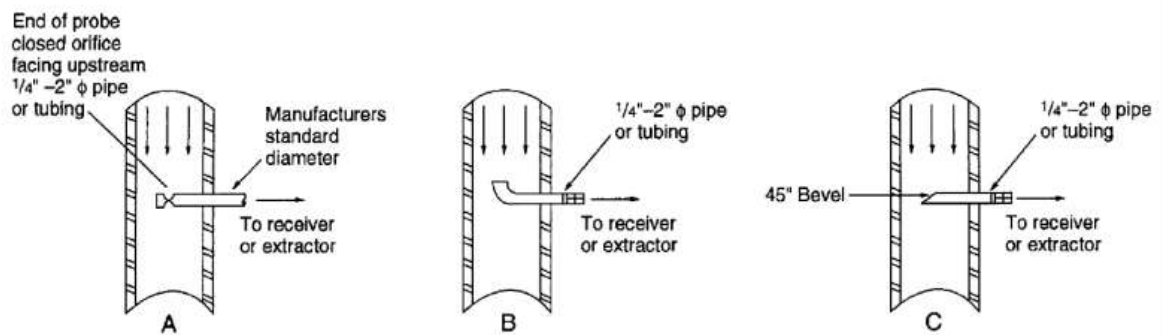
El diseño mecánico de la sonda debería ser compatible con las condiciones de operación y el fluido a ser muestreado. Hay tres diseños básicos mostrados en la Ilustración 16. Las aberturas de la sonda deberían estar en el área de muestreo especificada en el numeral 4.2.²⁰

Los diseños de sonda comúnmente utilizados se describen a continuación:

²⁰ API MPMS Cap.8.2. Procedimiento Estándar para Muestreo Automático de Petróleo Líquido. Washington D.C., 1995, 8,

- Una sonda de punta cerrada equipada con un orificio (Vea Ilustración 16 A).
- Un codo de corto radio o tubo doblado orientado corriente arriba. Se recomienda que la punta de la sonda este biselada en el diámetro interior para proporcionar una entrada bien definida (Vea Ilustración 16 B).
- 3. Un tubo con corte a un ángulo de 45° con el ángulo orientado corriente arriba (Vea Ilustración 16 C).

Ilustración 16: Diseños de la sonda de muestreo.



Fuente: API MPMS Cap.8.2. Procedimiento Estándar para Muestreo Automático de Petróleo Líquido. Washington D.C, 1995, Página 9.

Dado que los toma muestras instalados actualmente en el Campo en Estudio no tienen sonda, el diseño que se seleccionará para la prueba piloto será la tipo C, dada la facilidad de su fabricación y menores costos asociados.

4.4 LIQUIDACIÓN DE CORTE DE AGUA Y PRUEBAS DE PRODUCCIÓN

Se debe cuantificar adecuadamente al corte de agua y por ende los volúmenes de crudo y agua producida, para esto el API MPMS Cap. 20.1, expone los modelos matemáticos y físicos para garantizar y estandarizar la liquidación de volumen de las pruebas de producción.

A continuación se muestra el modelo para el cálculo de corte de agua a condiciones de proceso de medición en cabeza de pozo y para la liquidación final de volúmenes:

4.4.1 Cálculo de Corte de Agua a condiciones de Medición Los medios para determinar el corte de agua para pruebas de producción se pueden categorizar ampliamente en dos métodos, el estático y el dinámico. El método estático implica la obtención de una muestra de la emulsión para analizar el corte de agua en el laboratorio. El método dinámico utiliza un dispositivo electrónico para determinar el corte de agua a medida que fluye a través de la tubería.²¹

Para establecer adecuadamente la proporción de agua y crudo en una cantidad medida de emulsión, el corte de agua debe determinarse en las condiciones de medición. Para el corte de agua obtenido usando el método estático (muestreo), el valor observado en el laboratorio debe corregirse por los efectos de presión y temperatura para obtener los resultados más precisos. Esto es necesario porque la muestra utilizada para determinar el corte de agua en el laboratorio normalmente está a una temperatura y presión diferentes a la corriente que se mide en cabeza de pozo.²²

Con el objetivo de corregir los efectos de temperatura y presión en la medición de corte de agua por el método de análisis de laboratorio explicados en los numerales 3.3.1 y 3.3.2, el API MPMS Cap. 20.1 presenta en la Ecuación 2 el modelo matemático para la corrección de estos efectos de condiciones de laboratorio para llevarlos a condiciones de medición:

²¹ API MPMS Cap.20.1. Allocation Measurement. Washington D.C, 1993, Page 28.

²² API MPMS Cap.20.1. Allocation Measurement. Washington D.C, 1993, Page 28.

Ecuación 2

$$X_{w,m} = \frac{X_{w,s} * (CTL_{w,s}/CTL_{w,m})}{X_{w,s} * (CTL_{w,s}/CTL_{w,m}) + (1 - X_{w,s}) * (CTL_{o,s}/(CTL_{o,m} * SF))}$$

Donde:

X(w,s): Corte de agua de laboratorio.

CTL(w,s): Factor de corrección volumétrico del agua producida a temperatura de laboratorio.

CTL(w,m): Factor de corrección volumétrico del agua producida a temperatura de medición.

CTL(o,s): Factor de corrección volumétrico del crudo a temperatura de la muestra en Laboratorio.

CTL(o,m): Factor de corrección volumétrico del crudo a temperatura de medición.

SF: Factor de contracción volumétrica (Presión).

Este cálculo de corte de agua a condiciones de medición es una entrada para la liquidación de volúmenes de agua y crudo mostrado a continuación.

4.4.2 Liquidación de pruebas de producción de pozos según API MPMS

Cap 20.1 Este procedimiento se usa para el cálculo de los volúmenes netos producidos en los pozos donde se emplean métodos de muestreo estático para obtener una muestra representativa de la línea de flujo. La muestra se expone a la

presión atmosférica y el contenido de agua de la muestra se determina mediante métodos estándar de laboratorio.²³

En la Ecuación 3 se presenta el modelo para calcular la producción teórica, es decir, el volumen neto de aceite, en una emulsión de aceite / agua se expresa como:

Ecuación 3

$$V_{Crudo} = IV * MF * (1 - X_{w,m}) * CTL_{o,m} * SF$$

A continuación, en Ecuación 4 se presenta el modelo para calcular el volumen neto de agua producida es:

Ecuación 4

$$V_{w,st} = IV * MF * (X_{w,m}) * CTL_{w,m}$$

Donde:

V (crudo): Volumen de crudo corregido a condiciones estándar.

V (w,st): Volumen neto de agua producida.

IV: Volumen Indicado por Medidor de Flujo Coriolis.

MF: Factor de calibración del medidor de flujo.

X_{w,m}: Corte de agua corregido a condiciones de medición.

CTL_{o,m}: Factor de Corrección por temperatura del crudo a condiciones de medición

SF: Factor de contracción volumétrica (Presión).

CTL_{w,m}: Factor de corrección por temperatura del agua a condiciones de medición.

²³ API MPMS Cap.20.1. Allocation Measurement. Washington D.C., 1993, Pag 27.

De esta manera, se asegura la correcta liquidación de volúmenes producidos (Crudo y Agua), cuyo impacto en volumen por pozo puede ser en promedio de +/- 50 barriles de fluido total (para una tasa promedio de 6000 Bbls/Día con un corte de agua del 96.6%) correspondiente a un error en el volumen de +/- 0.85%.

5. CAPÍTULO 3: ANÁLISIS COMPARATIVO DE TECNOLOGÍAS DE MEDICIÓN DE CORTE DE AGUA EN TIEMPO REAL

En este capítulo se realizará el análisis y evaluación integral de las tecnologías de medición de corte de agua existentes en la industria petrolera a nivel mundial utilizando los criterios de: costo, rango de medición, repetibilidad y compatibilidad con las condiciones particulares del Campo en Estudio se seleccionarán las tecnologías que potencialmente aplicarían, las cuales serán evaluadas, calificadas y seleccionadas de acuerdo a la siguiente metodología:

5.1 METODOLOGÍA DE CALIFICACIÓN Y SELECCIÓN DE TECNOLOGÍAS

5.1.1 Criterios de Selección

- a) Criterio 1: Costo del equipo. (menor a 42.000 USD²⁴).
- b) Criterio 2: Rango de medición. (0-100% corte de agua).
- c) Criterio 3: Repetibilidad. (Menor a 0.5%).
- d) Criterio 4: Compatibilidad con condiciones particulares del campo en estudio, descritas a continuación:
 - Pozos con alto corte de agua (96% en promedio).
 - Crudo pesado (13°API @60°F).
 - Líneas de flujo de los pozos y manifold de 3".
 - Pozos con altas tasas de flujo (6000 BFPD en promedio).

²⁴ Corresponde al 40% del costo de realizar análisis de laboratorio por un tiempo de 5 años. Es decir, con la implementación de la tecnología de medición en tiempo real, se reduciría un 60% el costo de la medición de corte de agua aproximadamente.

- Múltiples pozos por clúster (8 en promedio), por lo cual el medidor de corte de agua debe tener la posibilidad de ser calibrado para varios pozos o tener la versatilidad de medir para condiciones de fluido cambiantes.
- La plataforma de automatización y control en los clúster dispone de facilidades de comunicación mediante protocolos no propietarios, tales como RS 485, RS 232, Ethernet, 4-20mA-HART.
- El campo en estudio no tiene certificación en manejo de fuentes radioactivas.²⁵

5.1.2 Asignación de puntaje Cada criterio de selección tendrá un puntaje de 25 puntos, teniendo así un total de 100 puntos. La asignación del puntaje de cada criterio será de 25 puntos si cumple y 0 puntos si no cumple.

El puntaje final de cada tecnología será la sumatoria de los puntajes asignados por cumplimiento de cada uno de los 4 criterios definidos.

Los criterios 2 y 4 son de obligatorio cumplimiento (Porque es mandatorio que el rango de medición sea de 0-100% dados los altos cortes de agua de los pozos del campo y porque la tecnología debe seleccionarse de acuerdo a las condiciones particulares del Campo en Estudio), en el caso que alguna de las tecnologías no los cumplan, serán descalificadas.

La tecnología que al final del ejercicio obtenga un puntaje de 75 puntos o más, y haya cumplido los criterios 2 y 4, serán las elegibles para la prueba piloto en el Campo en Estudio, con el orden de elegibilidad de acuerdo al puntaje obtenido, es decir, el que tenga mayor puntaje será la tecnología que tendrá la prioridad en la prueba.

²⁵ Todo campo petrolero en Colombia que utilice en sus operaciones fuentes radiactivas, debe ser acreditado para su uso por INGEOMINAS que es el ente regulador.

5.1.3 Calificación y selección de tecnologías Realizando la evaluación detallada de los criterios de selección para las tecnologías de medición de corte de agua en tiempo real que existen en el mercado de acuerdo a lo descrito en el numeral 5.1.1, y asignando los puntajes de acuerdo a lo descrito en el numeral 5.1.2 se obtuvieron los siguientes resultados presentados en la Tabla 3:

Tabla 3: Tabla comparativa de tecnologías de medición de corte de agua en tiempo real.

Tabla Comparativa de Tecnologías de Medición de Corte de Agua en Tiempo Real										
Tipo de Sensor	Criterio 1		Criterio 2		Criterio 3		Criterio 4		RESULTADO	
	Costo (USD)	Puntaje	Rango de Medición	Puntaje	Repetibilidad	Puntaje	Compatibilidad con condiciones particulares del campo en estudio	Puntaje	Puntaje Final	¿Tecnología Elegible para Prueba?
Coriolis	\$ 30.000	25	(0-100%)	25	No definido.	0	NO CUMPLE. Al ser la densidad del crudo (13°API) tan cercana a la del agua (10°API). Por el principio de funcionamiento difícilmente reconocerá la diferencia de crudo y agua a tan altos cortes de agua. ²⁶	0	50	NO
Absorción de Infrarrojos	\$ 38.000	25	(0-100%)	25	0,10%	25	CUMPLE con todos los requisitos	25	100	SI
Absorción de Rayos Gamma	\$ 125.000	0	(0-100%)	25	0,20%	25	NO CUMPLE. El principio de funcionamiento requiere la utilización de fuentes radioactivas. Y el Campo en Estudio NO cuenta con certificación en manejo de fuentes radioactivas.	0	50	NO
Capacitiva	\$ 11.500	25	(0-25%)	0	0,10%	25	NO CUMPLE. El rango de medición de corte de agua es de 0-25% cuando el Campo de estudio tiene un promedio de corte de agua de 96%.	0	50	NO
Resonancia de Microondas	\$ 91.000	0	(0-100%)	25	0,25%	25	CUMPLE con todos los requisitos	25	75	SI

²⁶ Este concepto tiene como fundamento pruebas realizadas con medidores Coriolis para campos de producción de crudo pesado, en los cuales no han dado buenos resultados (Incertidumbres mayores al 5%).

Siguiendo la metodología de evaluación y selección de las tecnologías de medición de corte de agua en tiempo real, se tiene que sólo 2 tecnologías podrían potencialmente funcionar para el Campo en Estudio, a continuación en su orden de elegibilidad:

Tabla 4: Tecnologías elegibles para la prueba piloto en el Campo en Estudio.

Tecnología	Puntaje Final	Orden de Elegibilidad
Absorción de Infrarrojos	100	1
Resonancia de Microondas	75	2

De tal manera, la prueba piloto en el Campo en Estudio se realizará con la tecnología de absorción de infrarrojos. En caso tal, que la prueba con el medidor de absorción de infrarrojos no sea exitosa, se procederá a probar la tecnología de resonancia de microondas.

6. CAPÍTULO 4: ESTRATEGIA DE LA MEJORA PARA LA REDUCCIÓN DE LA INCERTIDUMBRE EN LA MEDICIÓN DE CORTE DE AGUA

De acuerdo a lo analizado en los capítulos anteriores, en los cuales se revisaron las recomendaciones de los estándares internacionales de medición y con la posibilidad de la implementación de tecnologías de medición de corte de agua en tiempo real, a continuación se presentarán las oportunidades de mejora identificadas para la reducción de la incertidumbre del Campo en Estudio:

6.1 ASEGURAMIENTO DE UNA BUENA DISPERSIÓN DEL FLUIDO

Para el caso del Campo en Estudio y de acuerdo a lo revisado en el numeral 4.1, en los toma muestras ubicados en cabeza de pozo, que están instalados en orientación Vertical con elementos de tubería para mezclado, el criterio de validación de velocidad mínima requerida para una buena dispersión de la muestra es de 1.3 metros por segundo.

En los toma muestras ubicados en el manifold de prueba, que están instalados en orientación vertical con mezclador estático, el criterio de validación de velocidad de flujo sería 1.1 metros por segundo.

En el caso de clúster y/o pozos que tengan velocidades de flujo inferiores, se deberá instalar mezclador estático aguas arriba del sitio de muestreo o de medición electrónica con el objetivo de asegurar la adecuada dispersión del fluido.

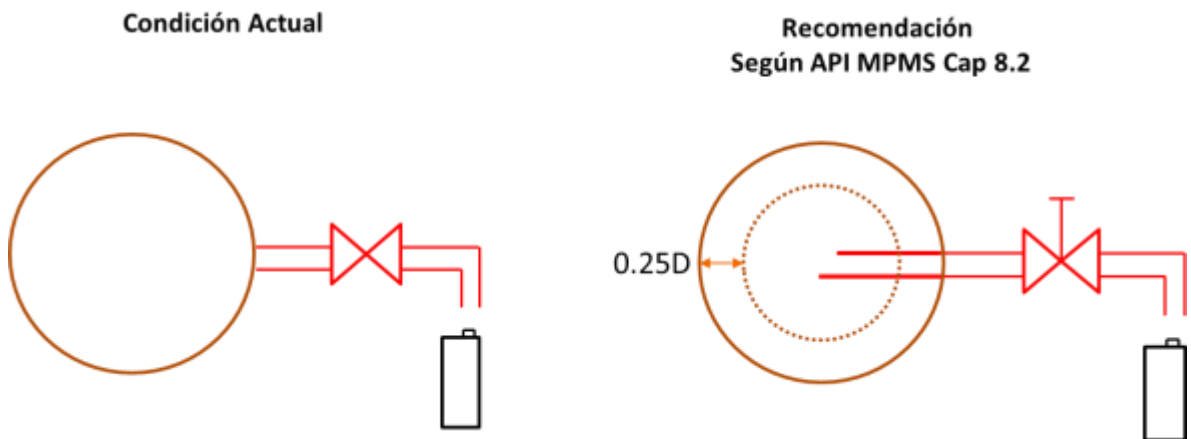
6.2 MUESTREO APROPIADO

Con el objetivo de asegurar una muestra representativa del fluido, se recomienda:

- El área de muestreo debe ser aproximadamente el centro medio de la tubería (entre el 25% al 75% del diámetro de la tubería).
- La abertura de la sonda debe estar orientada corriente arriba y el cuerpo externo de la sonda debería ser etiquetado con la dirección del flujo para verificar que la sonda está instalada correctamente.
- La sonda debe colocarse en la zona donde se obtenga un mezclado suficiente que origine un adecuado acondicionamiento de flujo. Esta zona es generalmente de tres a diez diámetros corriente abajo de los elementos de la tubería, 0.5 a 4 diámetros de los mezcladores estáticos y tres a diez diámetros de mezcladores motorizados.
- El diseño que se seleccionará para la prueba piloto será la de ángulo a 45°, dada la facilidad de su fabricación y menores costos asociados.
- Continuar con el procedimiento estándar del Campo en Estudio para muestreo en líneas de fluido.

En la Ilustración 17 se muestra el resumen de las recomendaciones a implementar:

Ilustración 17: Recomendación de diseño e instalación de sonda toma muestras.



6.3 ANÁLISIS DE LABORATORIO

Con el objetivo de reducir la incertidumbre del análisis de corte de agua, se recomienda:

- Utilizar vidriería (Embudos de separación, probetas y zanahorias) calibrada y certificada ONAC.
- Continuar con el correcto aseguramiento de la trazabilidad de la información, tratamiento y buen manejo de la muestra para el análisis.
- Realizar capacitaciones periódicas anuales al personal encargado de los análisis de laboratorio para mantener sus competencias y la estandarización del método.
- Seguir los protocolos y procedimientos corporativos estandarizados para la realización de pruebas para la medición de corte de agua.

6.4 IMPLEMENTACIÓN DE LA TECNOLOGÍA DE MEDICIÓN DE CORTE DE AGUA EN TIEMPO REAL DE ABSORCIÓN DE INFRAROJOS (NIR).

De acuerdo al resultado del análisis comparativo de tecnologías de medición de corte de agua en tiempo real (Capítulo 3), la tecnología de medición seleccionada para la implementación, y por ende, parte de esta estrategia de reducción de incertidumbre de la medición de corte de agua para el Campo en Estudio, es la absorción de rayos infra rojos (NIR). Para el Campo en Estudio se utilizará el medidor Red Eye® de Weatherford, pues es el único medidor con esta tecnología para la medición de corte de agua en el mercado de la industria petrolera actual. A continuación en la Ilustración 18 se muestra una imagen del equipo Red Eye MP:

Ilustración 18: Medidor Red Eye MP.



Fuente: Weatherford, "Red Eye Water-Cut Meter," [Online]. Available: <https://www.weatherford.com/en/documents/brochure/products-and-services/production-optimization/red-eye%20AE-series-of-water-cut-meters/>

Para garantizar el correcto funcionamiento de este equipo es necesario:

- Muestras de crudo deshidratado (BSW<0.5%) de los pozos activos de los clúster A y B para su calibración pozo a pozo (El equipo permite la calibración de hasta 16 pozos).
- Instalación vertical u horizontal que cumpla las velocidades mínimas que aseguren la buena dispersión del fluido de acuerdo a lo recomendado en el numeral 6.1. Se instalará en el clúster A de forma vertical y en el clúster B de forma horizontal en el manifold de prueba.

- La sonda del Red Eye debe estar instalada en la tubería asegurando que el sensor óptico se encuentre en el área de muestreo recomendada en el numeral 6.2.
- Para el seguimiento del comportamiento del corte de agua de los pozos, se requiere monitoreo remoto utilizando el protocolo de comunicaciones MODBUS RS585 a través de la tarjeta de prosoft del PLC de control de clúster A y B.
- Configuración de selección electrónica de los pozos vía SCADA y local a través del HMI disponible en el Shelter de variadores de los clúster A y , dado que el medidor no cuenta con selector en el display.

6.5 ADECUADA LIQUIDACIÓN DE CORTE DE AGUA Y VOLÚMENES

Tal como se revisó en el numeral 4.4, es necesario asegurar la correcta liquidación de corte de agua (numeral 4.4.1) y de pruebas de producción (numeral 4.4.2).

Para cuando se utilice el medidor Red Eye para la medición de corte de agua no será necesario realizar el ajuste y corrección mencionado en el numeral 4.4.1, pues la medición de corte de agua se hace en línea y a las mismas condiciones de proceso (Presión y Temperatura) del medidor tipo Coriolis que estará instalado en serie (inmediatamente aguas abajo del Red Eye). La liquidación volumétrica de pruebas de producción (numeral 4.4.2) se realizará en todos los casos.

Para la prueba piloto del medidor Red Eye en los clúster A y B del Campo en estudio, se deberá realizar la respectiva liquidación de corte de agua (numeral 4.4.1) para las muestras de los pozos y así realizar la correcta comparación de las mediciones de corte de agua del Red Eye y de laboratorio, que en este caso, será la medición de referencia para la validación de la conformidad de la medición del Red Eye, cuya tolerancia máxima permitida será de +/- 2% de error absoluto, que es el criterio de

validación definido por el ministerio de minas y energía descrito en el artículo 34 de la resolución 41251 del 23 de Diciembre de 2016.

7. CAPÍTULO 5: IMPLEMENTACIÓN (PRUEBA PILOTO).

En este capítulo se presentan las acciones implementadas de la estrategia propuesta para la reducción de la incertidumbre de la medición de corte de agua en los clúster A y B del Campo en Estudio (numeral 6).

7.1 VALIDACIÓN DE VELOCIDADES DE FLUJO EN LOS CLUSTERS A Y B

A continuación se presentan los resultados de la validación de velocidades de flujo de los clúster A y B de acuerdo a los criterios definidos en la estrategia (numeral 6.1).

7.1.1 Clúster A Realizando el levantamiento de la información de caudal y diámetros de tubería de los 8 pozos activos del clúster A, se realizó el cálculo de la velocidad de flujo en metros por segundo, tomando el criterio de velocidad mínima para instalación vertical (1.3 m/s) mostrado en la Tabla 5:

Tabla 5: Validación de velocidades de flujo clúster A.

VALIDACIÓN VELOCIDADES DE FLUJO - CLUSTER A								
POZO	CLUSTER	Caudal (BFPD)	Caudal (M3/sec)	Diámetro Tubería (Inch)	Diámetro (m)	Área de tubería (m ²)	Velocidad de Flujo (m/s)	¿Cumple Velocidad Mínima?
370	CLUSTER A	3340	0,0061	3	0,08	0,0046	1,35	SI
381	CLUSTER A	8089	0,0149	3	0,08	0,0046	3,22	SI
382H	CLUSTER A	7972	0,0147	3	0,08	0,0046	3,22	SI
383H	CLUSTER A	4408	0,0081	3	0,08	0,0046	1,78	SI
1122H	CLUSTER A	3250	0,0060	3	0,08	0,0046	1,31	SI
1123H	CLUSTER A	7752	0,0143	3	0,08	0,0046	3,13	SI
1190H	CLUSTER A	5130	0,0094	3	0,08	0,0046	2,07	SI
1254H	CLUSTER A	4456	0,0082	3	0,08	0,0046	1,80	SI

Tal como se puede observar en la Tabla 5, todos los pozos cumplen con la velocidad mínima necesaria para asegurar la adecuada dispersión del fluido en los puntos de muestreo y de medición del Red Eye.

7.1.2 Clúster B Realizando el levantamiento de la información de caudal y diámetros de tubería de los 6 pozos activos del clúster B, se realizó el cálculo de la velocidad de flujo en metros por segundo, tomando el criterio de velocidad mínima para instalación vertical (1.3 m/s) mostrado en la Tabla 6:

Tabla 6: Validación de velocidades de flujo clúster B.

VALIDACIÓN VELOCIDADES DE FLUJO - CLUSTER B								
POZO	CLUSTER	Caudal (BFPD)	Caudal (M3/sec)	Diámetro Tubería(Inch)	Diámetro (m)	Área de tubería (m2)	Velocidad de Flujo (m/s)	¿Cumple Velocidad Mínima?
628	CLUSTER B	3493	0,0064	3	0,08	0,0046	1,41	SI
658H	CLUSTER B	7225	0,0133	3	0,08	0,0046	2,92	SI
660H	CLUSTER B	9955	0,0183	3	0,08	0,0046	4,02	SI
674H	CLUSTER B	8844	0,0163	3	0,08	0,0046	3,57	SI
868HST	CLUSTER B	5803	0,0107	3	0,08	0,0046	2,34	SI
1193H	CLUSTER B	8953	0,0165	3	0,08	0,0046	3,61	SI

Tal como se puede observar en la Tabla 6, todos los pozos cumplen con la velocidad mínima necesaria para asegurar la adecuada dispersión del fluido en los puntos de muestreo y de medición del Red Eye.

7.2 TOMA MUESTRAS

A continuación, en la

Ilustración 19, se presenta la implementación de las recomendaciones para los toma muestras en los clúster A y B, en el cual se asegura la toma de muestras representativas para la medición de corte de agua.

Ilustración 19: Toma muestras fabricado para Clúster A y B.



Tal como se puede observar en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, las sondas toma muestras se fabricaron con ángulo de 45° y se instalaron en cabeza de pozo y en los manifold de prueba de tal manera que la punta esté ubicada en la mitad del diámetro de la tubería.

7.3 PRUEBA PILOTO - MEDIDOR RED EYE

De acuerdo al análisis comparativo de tecnologías de medición de corte de agua en tiempo real, en el Campo en Estudio se adquirieron dos (2) medidores Red Eye para la prueba piloto, a los cuales se les realizará su respectiva calibración, instalación y monitoreo remoto, para luego seguir con la respectiva prueba y validación de la conformidad de su medición. En este capítulo se detalla el paso a paso de las actividades ejecutadas en los clúster A y B del Campo en Estudio.

7.3.1 Calibración El medidor Red Eye permite la calibración de hasta 16 pozos diferentes, de tal forma, para los clúster A y B, se tomaron muestras de todos los pozos activos (14 pozos) y se deshidrataron hasta lograr un BSW menor a 0.5% (Ilustración 20). Cabe resaltar que el análisis de BSW para las muestras

deshidratadas se realizó con el método de Karl Fischer, dado que tiene una menor incertidumbre (0.00140%).

Ilustración 20: Muestra Pozo 1123H patrón de crudo deshidratado.



Utilizando las muestras de crudo deshidratado de los pozos de los clúster A y B, se procedió a la calibración de los medidores Red Eye a tres (3) puntos de absorción óptica, con agua (100% Corte de Agua), crudo deshidratado (0% de Corte de Agua) y aire (vacío).

Para la calibración de cada uno de los tres (3) puntos se instala un capuchón (Color Rojo), que contiene el fluido en el sensor óptico, el cual se llena de crudo o agua, según sea el caso de 0% de corte de agua o 100% de corte de agua, o se deja vacío para el punto de calibración con aire. A continuación el detalle del procedimiento para cada uno de los puntos de calibración:

- Calibración Punto 1 (Aire)

Dejando el sensor del Red Eye en contacto con el aire, se procede a realizar la calibración de Aire o vacío, en la Ilustración 21 se presenta la selección del tipo de calibración “Air Calibration” y se ejecuta el comando “Calibrate”. Adicional se muestra la absorción óptica en cada uno de los cuatro (4) canales Ch1, Ch2, Ch3 y Ch4.

Ilustración 21: Procedimiento calibración punto 1 (Aire) - Software Red Eye.



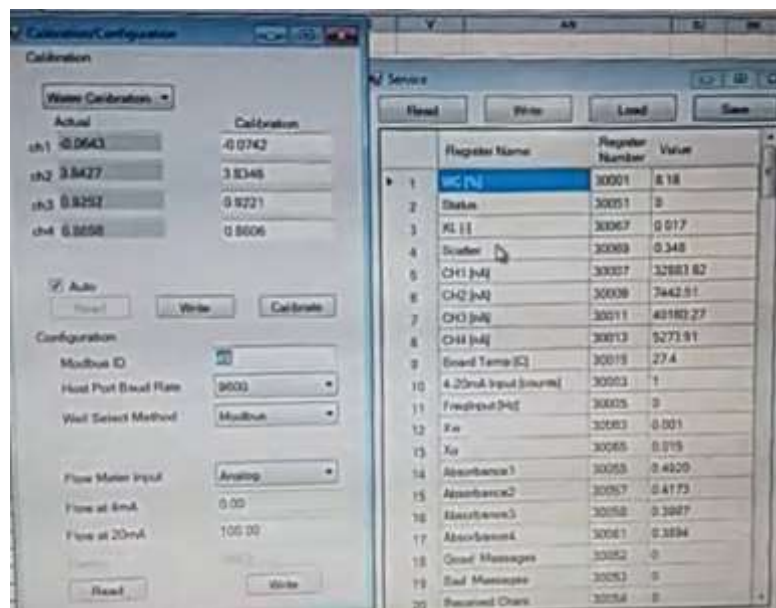
- Calibración Punto 2 (Agua)

Se llena el capuchón (Color Rojo), con ayuda de un gotero, de agua pura (Ilustración 22) y se procede a realizar la calibración de Aire o vacío, en la Ilustración 23 se presenta la selección del tipo de calibración "Water Calibration" y se ejecuta el comando "Calibrate". Adicional se muestra la absorción óptica en cada uno de los cuatro (4) canales Ch1, Ch2, Ch3 y Ch4.

Ilustración 22: Procedimiento calibración punto 2 (Agua).



Ilustración 23: Calibración de agua – Software Red Eye.



- Calibración Punto 3 (Crudo)

Se llena el capuchón (Color Rojo) de la muestra de crudo deshidratado de cada uno de los pozos (Ilustración 24 e Ilustración 25) y se configura el número de pozo a calibrar en el software del Red Eye la absorción óptica asociada a la muestra en particular, generando así una calibración y reconocimiento óptico pozo a pozo, tal como se puede observar en la Ilustración 26:

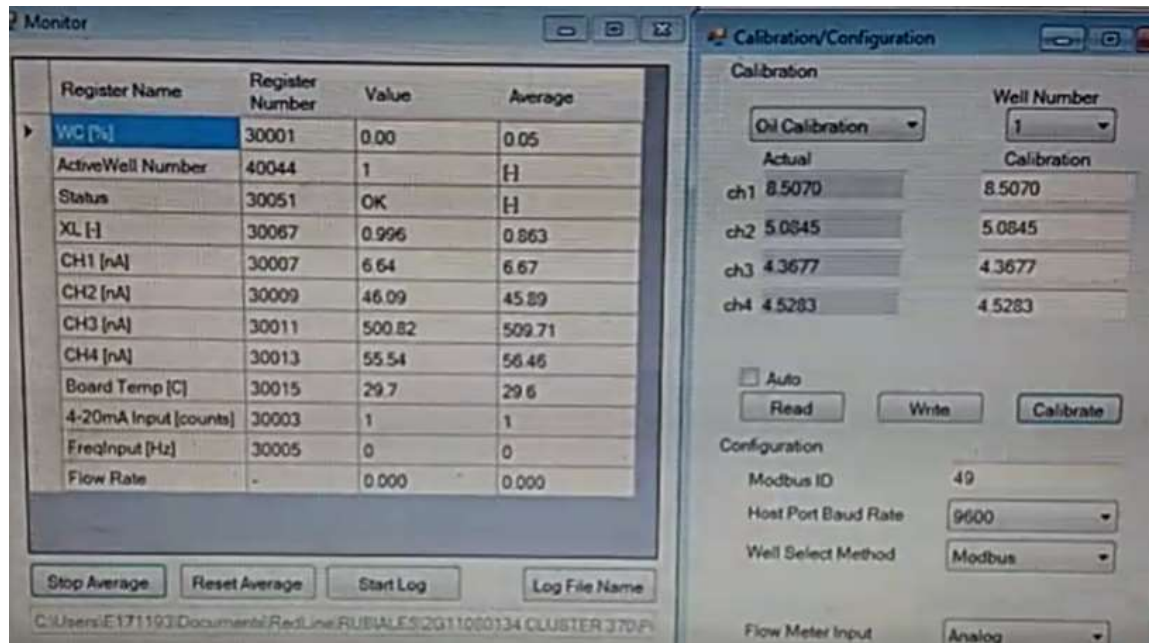
Ilustración 24: Procedimiento calibración punto 3 – crudo deshidratado.



Ilustración 25: Procedimiento calibración punto 3 – crudo deshidratado.



Ilustración 26: Calibración de agua – Software Red Eye.



Este procedimiento se repite para cada uno de los pozos de los clúster A y B, en resumen, en la Tabla 7 y Tabla 8 se muestra la configuración final para los dos medidores Red Eye:

Tabla 7: Configuración de pozos del clúster A según calibración pozo a pozo.

Red Eye - Clúster A	
# Well Red Eye	Pozo
Well 1	370
Well 2	382H
Well 3	383H
Well 4	1123H
Well 5	1190H
Well 6	1254
Well 7	381
Well 8	1122

Tabla 8: Configuración de pozos del clúster B según calibración pozo a pozo.

Red Eye - Clúster B	
# Well Red Eye	Pozo
Well 1	628

Well 2	658
Well 3	674
Well 4	868HST
Well 5	1193H
Well 6	660H

7.3.2 Instalación y puesta en operación Una vez realizado el proceso de calibración pozo a pozo de los dos Red Eye para los clúster A y B del Campo en Estudio, se procedió a su instalación, puesta en operación y ajuste fino de la medición de corte de agua.

- Clúster A

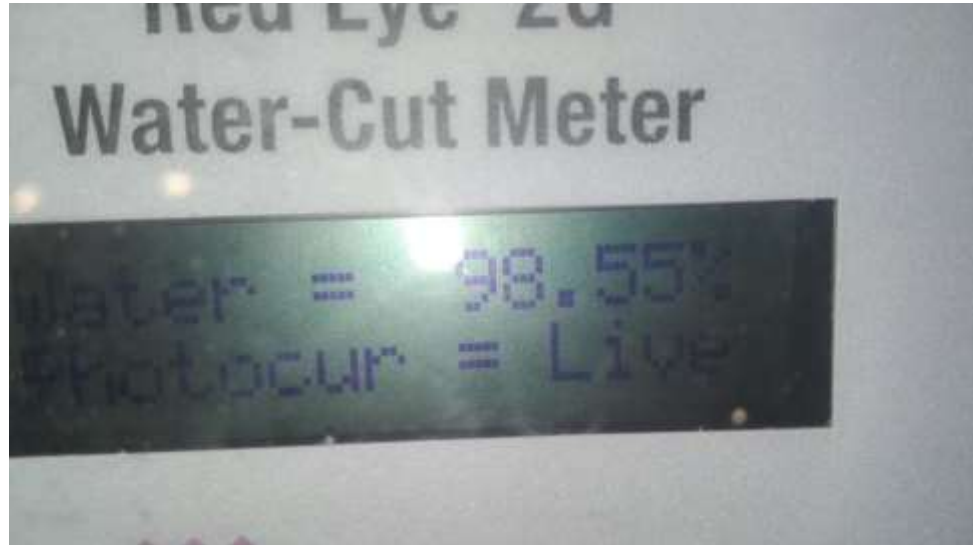
En la Ilustración 27, se muestra el resultado del proceso de instalación (Mecánica, eléctrica y de instrumentación) horizontal del medidor Red Eye en el manifold de prueba del clúster A:

Ilustración 27: Medidor Red Eye instalado en clúster A.



Una vez fue instalado, se realizó el proceso de comisionamiento y prueba de facilidades mecánicas, acometidas eléctricas y de instrumentación para su puesta en operación confiable. En la Ilustración 28 se muestra el Red Eye debidamente energizado y midiendo el corte de agua en tiempo real.

Ilustración 28: Medición Red Eye en clúster A.



- Clúster B

A continuación, en la Ilustración 29, se muestra el resultado del proceso de instalación (Mecánica, eléctrica y de instrumentación) horizontal del medidor Red Eye en el manifold de prueba del clúster B:

Ilustración 29: Medidor Red Eye instalado en clúster B.



Una vez fue instalado, se realizó el proceso de comisionamiento y prueba de facilidades mecánicas, acometidas eléctricas y de instrumentación para su puesta en operación. En la Ilustración 30 se muestra el Red Eye debidamente energizado y midiendo el corte de agua en tiempo real.

Ilustración 32: PLC Control Logix SCC – Tarjeta de comunicaciones Prosoft.



Luego, se realizó la configuración en las pantallas del HMI local del Sistema Central de Clúster, para visualizar el corte de agua y para los comandos de control de cambio de pozo, tal como se puede observar en la Ilustración 33 y la Ilustración 34:

Ilustración 33: Pantalla HMI del Sistema Central de Clúster.

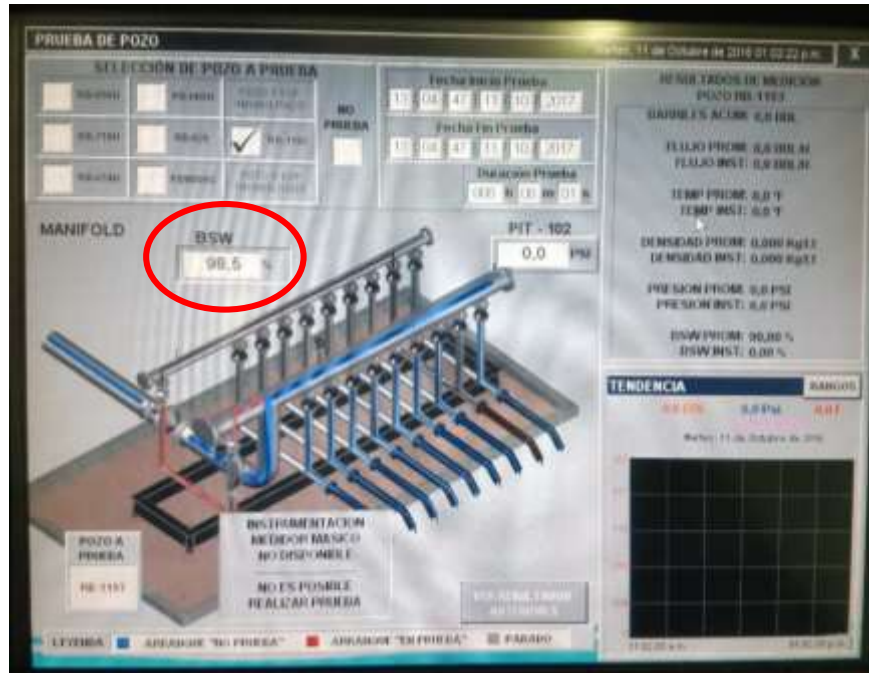


Ilustración 34: Zoom selección de pozo a prueba.



Luego, se realizó la configuración de la pantalla en el sistema SCADA, para tener la opción que el técnico de monitoreo remoto (ubicado en las oficinas principales del

Campo en Estudio) tenga la posibilidad de visualizar y seleccionar el pozo a probar de forma remota.

Adicional al sistema de visualización y control de los pozos a prueba, se realizó la configuración de la variable de corte de agua en la base de datos en tiempo real del Campo en Estudio, para poder tener acceso histórico y en tiempo real de la medición de BSW de los pozos de los clúster A y B.

7.3.4 Protocolo de pruebas El protocolo de pruebas para el piloto se compone de las siguientes actividades:

- a) Plan de pruebas Red Eye.
- b) Muestreo
- c) Análisis de muestras.
- d) Seguimiento

A continuación se presentará el detalle de las actividades realizadas:

- a) Plan de pruebas Red Eye

Los 14 pozos fueron probados por un periodo de 12 horas cada uno cubriendo las 24 horas del día, y muestreados cada dos (2) horas de forma sincronizada para cubrir los dos clúster.

El total diario de muestras tomadas y analizadas fue de 24 (6 muestras por pozo cubriendo 4 pozos al día). La prueba se realizó durante siete (7) días consecutivos. A continuación, en la Tabla 9 y Tabla 10 se presentará el cronograma detallado:

Tabla 9: Cronograma de prueba Red Eye Clúster A.

CLUSTER	POZO	Prueba de pozo durante 12 Horas						
CLUSTER A	370	Día 1				Día 5		
CLUSTER A	381H	Día 1				Día 5		
CLUSTER A	382H		Día 2				Día 6	

CLUSTER A	383H		Día 2				Día 6	
CLUSTER A	628			Día 3				Día 7
CLUSTER A	1122H			Día 3				Día 7
CLUSTER A	1123H				Día 4			
CLUSTER A	1190H				Día 4			

Tabla 10: Cronograma de prueba Red Eye Clúster B.

CLUSTER	POZO	Prueba de pozo durante 12 Horas						
CLUSTER B	628	Día 1			Día 4			Día 7
CLUSTER B	658	Día 1			Día 4			Día 7
CLUSTER B	674		Día 2			Día 5		
CLUSTER B	868HST		Día 2			Día 5		
CLUSTER B	1193H			Día 3				Día 6
CLUSTER B	660H			Día 3				Día 6

b) Muestreo

El procedimiento de muestreo se realizó de acuerdo a los procedimientos corporativos del Campo en Estudio, rotulando apropiadamente cada muestra con fecha hora y número del pozo, verificando la cantidad de muestras y asegurando el cumplimiento al cronograma de muestreo definido (Ilustración 35, Ilustración 36 e Ilustración 37).

Ilustración 35: Muestreo Clúster A - Prueba piloto.



Ilustración 36: Muestreo Clúster B - Prueba piloto.



Ilustración 37: Muestra # 1 de la prueba piloto.



c) Análisis de muestra

En el laboratorio industrial del Campo en Estudio se realizó el análisis de las muestras de acuerdo a los procedimientos corporativos del Campo en Estudio y las normas ASTM 4007 (Medición de BSW por centrífuga) y ERCB Directive 46 Apéndice C (Procedimiento de Corte de Agua). Se reportó el resultado de los análisis diariamente especificando hora, fecha y resultado de medición de corte de Agua de cada una de las muestras. Las muestras objeto de estas pruebas fueron analizadas con prioridad sobre las muestras convencionales.

Ilustración 38: Análisis muestras de la prueba piloto.



d) Seguimiento

Se consolidó la información de los resultados tanto de laboratorio como del medidor de Corte de agua, y se realizó el cálculo de porcentaje de error y su respectiva validación con respecto a la tolerancia máxima de 2% en error absoluto definida por el Ministerio de Minas y Energía en su resolución 41251 del 23 de Diciembre de 2016, por ejemplo en la Tabla 11 se presenta un extracto del archivo de seguimiento realizado para el clúster A:

Tabla 11: Registro de seguimiento de prueba para clúster A.

Campo Rubiales							
Cluster	A						
FECHA	Registro de Prueba						
	HORA	Pozo	RED EYE (%Corte de Agua)	Laboratorio (%Corte de Agua) Condiciones Medición	Error Red Eye vs Lab (Condiciones de Medición)	Error - Red Eye vs Lab (Condiciones de Medición)	Cumple? Vs Condiciones de Medición
8/10/2017	12:30:00 p. m.	RB-1190H	98,32%	97,57%	-0,75%	-0,76%	Si
8/10/2017	02:30:00 p. m.	RB-1190H	98,32%	100,00%	1,68%	1,68%	Si
8/10/2017	04:30:00 p. m.	RB-1190H	98,00%	100,00%	2,00%	2,00%	Si
8/10/2017	06:30:00 p. m.	RB-1190H	98,22%	100,00%	1,78%	1,78%	Si
8/10/2017	07:30:00 p. m.	RB-382H	97,45%	97,23%	-0,22%	-0,23%	Si
8/10/2017	09:30:00 p. m.	RB-382H	97,07%	98,30%	1,23%	1,25%	Si
8/10/2017	11:30:00 p. m.	RB-382H	97,06%	97,42%	0,36%	0,37%	Si
9/10/2017	01:30:00 a. m.	RB-382H	97,02%	97,96%	0,94%	0,96%	Si
9/10/2017	03:30:00 a. m.	RB-382H	96,94%	98,97%	2,03%	2,05%	No
9/10/2017	05:30:00 a. m.	RB-382H	97,13%	98,97%	1,84%	1,86%	Si
9/10/2017	07:10:00 a. m.	RB-1254H	98,35%	100,00%	1,65%	1,65%	Si
9/10/2017	09:10:00 a. m.	RB-1254H	98,33%	100,00%	1,67%	1,67%	Si
9/10/2017	11:10:00 a. m.	RB-1254H	98,32%	99,43%	1,11%	1,12%	Si
9/10/2017	01:15:00 p. m.	RB-1254H	98,33%	98,83%	0,50%	0,51%	Si
9/10/2017	03:15:00 p. m.	RB-1254H	98,31%	100,00%	1,69%	1,69%	Si

Tal como se puede observar en la Tabla 11 , el comportamiento inicial de los pozos asociados al clúster A tuvo un comportamiento dentro del rango de tolerancia definido por el Ministerio de Minas y Energía en la resolución 41251 artículo 34 (+/- 2% en error absoluto).

7.3.5 Resultado Una vez terminada la prueba, se realizó el proceso de consolidación de la información global, el resumen se presentará de forma gráfica en la Ilustración 39 para el clúster A y en la Ilustración 40 para el clúster B:

Ilustración 39: Resultado seguimiento prueba piloto clúster A.

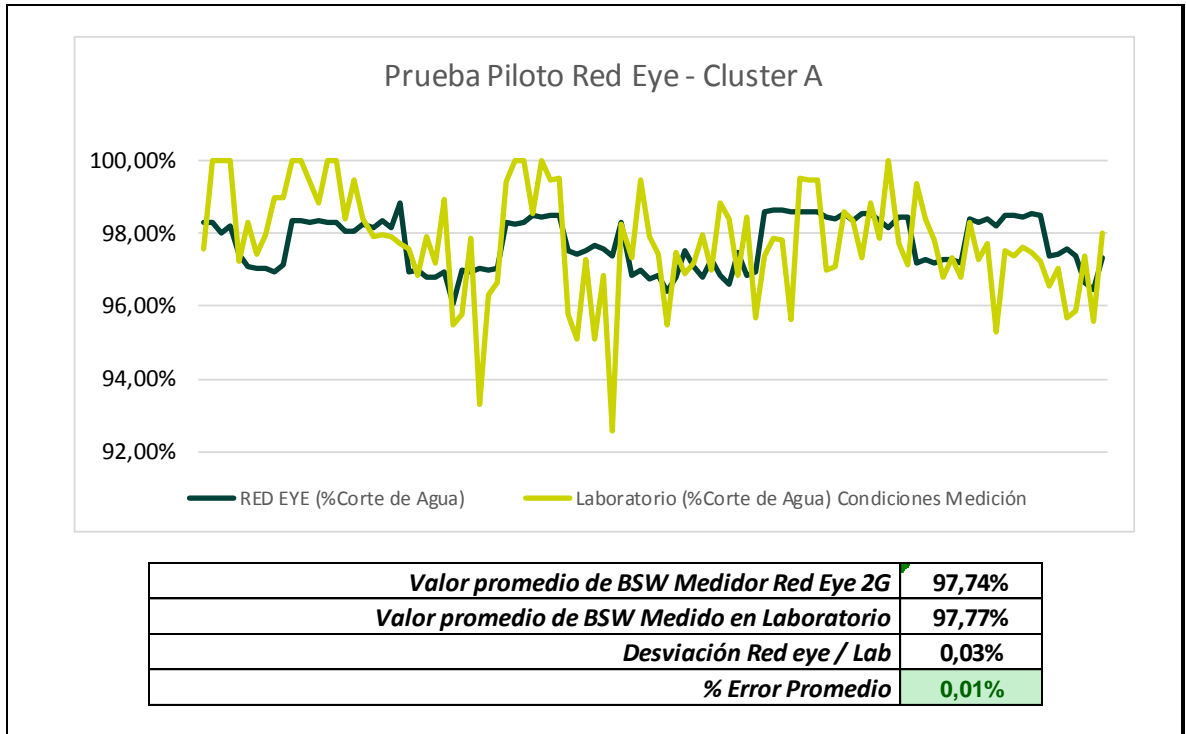
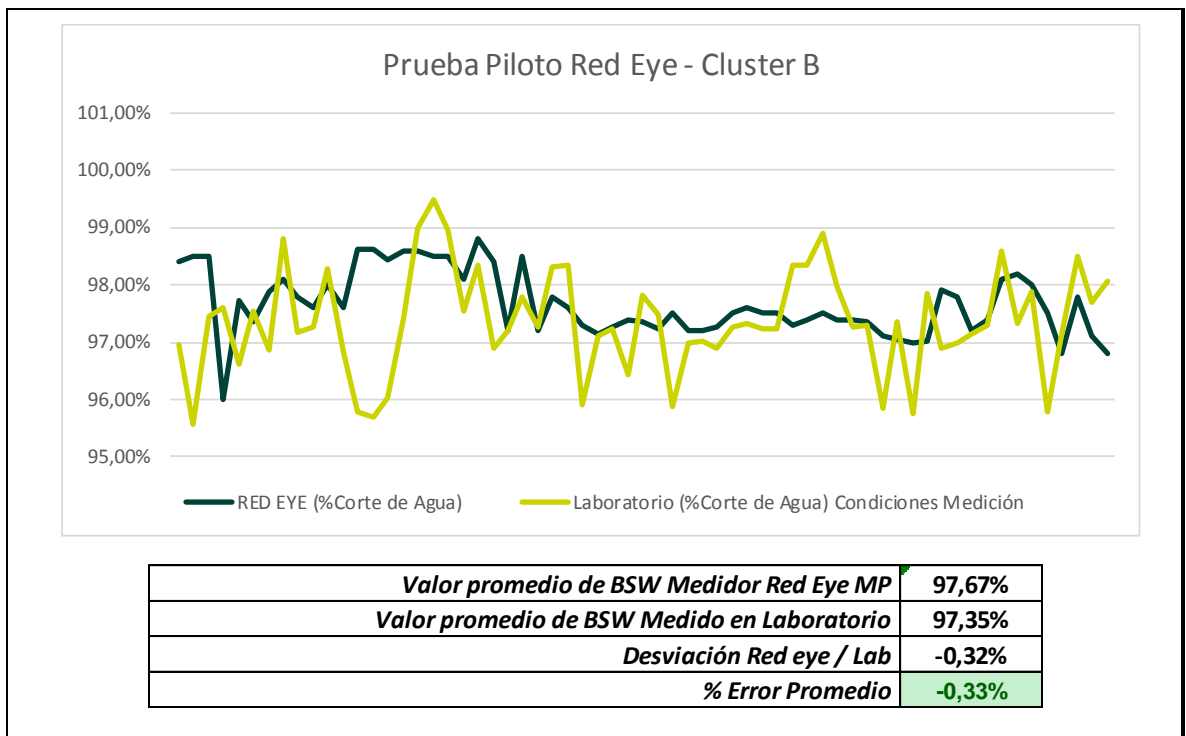


Ilustración 40: Resultado seguimiento prueba piloto clúster B.



Tal como se puede observar en las gráficas presentadas, el comportamiento de los medidores Red Eye para los 7 días de prueba fue destacado, teniendo porcentajes de error promedio de 0.01% para el Red Eye del Clúster A y de -0.33% para el Clúster B, valores que están muy por debajo del rango máximo permitido de +/-2% definido por el ministerio de minas y energía en la resolución 41251 para validación de equipos electrónicos de medición de corte de agua. A continuación, en el capítulo 6 se presentará la evaluación de resultados.

8. CAPÍTULO 6: EVALUACIÓN DE RESULTADOS.

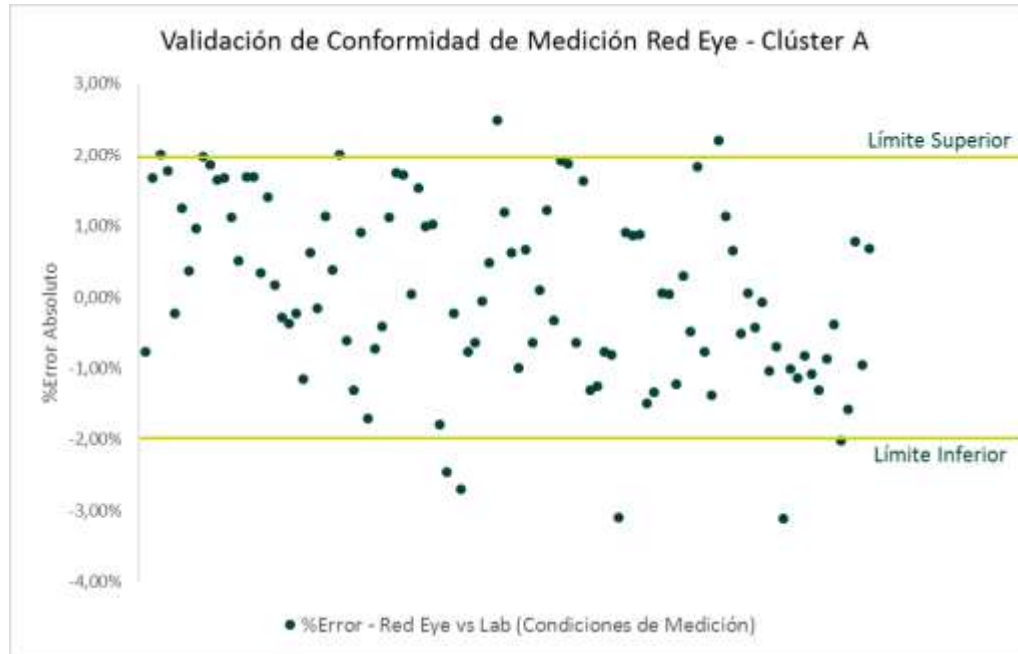
En este capítulo, se realizará el análisis y evaluación de los datos que se obtuvieron de la prueba piloto de medición electrónica de corte de agua en tiempo real, en primer lugar se realizará la validación general de la conformidad de la medición, en segundo lugar se presentará el resultado de las pruebas de repetibilidad para la estimación de la incertidumbre y finalmente evaluar su reducción.

8.1 VALIDACIÓN DE LA CONFORMIDAD DE LA MEDICIÓN RED EYE

A continuación se presentará la validación de la conformidad de la medición de los Red Eye de los Clúster A y B del Campo en Estudio, en la cual se realizó la comparación del error absoluto de cada uno de las pruebas de la medición (Red Eye y laboratorio) versus los límites de tolerancia estipulados en el artículo 34 de la resolución 41251 del Ministerio de Minas y Energía (+/- 2%) que reglamenta la medición de volumen y la determinación de la calidad de los hidrocarburos producidos en Colombia para la liquidación de las regalías y pruebas de producción de los pozos.

8.1.1 Red Eye instalado en el Clúster A En la Ilustración 41 se presenta la dispersión de los 102 datos de error absoluto producto de la resta del valor de corte de agua medido por el Red Eye y el valor de corte de agua medido por laboratorio:

Ilustración 41: Validación de conformidad de medición Red Eye – Clúster A



Tal como se puede observar en la Tabla 12, el 92% de los datos de la prueba piloto estuvieron dentro de los límites inferior (-2%) y superior (2%), teniendo como resultado una medición conforme.

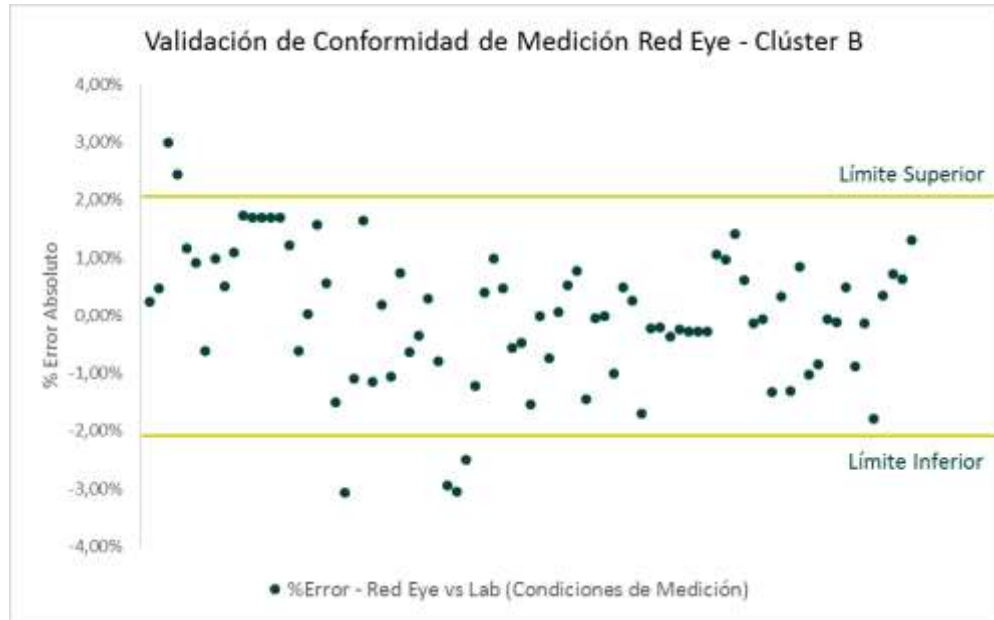
Tabla 12: %Éxito - clúster A.

% Éxito - Datos dentro del límite - Clúster A	
Dentro de Límite	94
Fuera de Límite	8
Total Datos	102
% Éxito	92%

El porcentaje de éxito se calculó como el porcentaje del número de datos que entraron en el límite sobre el total de datos tomados en la prueba.

8.1.2 Red Eye instalado en el Clúster B En la Ilustración 42 se presenta la dispersión de los 83 datos de error absoluto producto de la resta del valor de corte de agua medido por el Red Eye y el valor de corte de agua medido por laboratorio:

Ilustración 42: Validación de conformidad de medición Red Eye – Clúster B



Tal como se puede observar en la Tabla 13, el 93% de los datos de la prueba piloto estuvieron dentro de los límites inferior (-2%) y superior (2%), teniendo como resultado una medición conforme.

Tabla 13: %Éxito - clúster B.

% Éxito - Datos dentro del límite - Clúster B	
Dentro de Límite	77
Fuera de Límite	6
Total Datos	83
% Éxito - Clúster B	
	93%

El porcentaje de éxito se calculó como el porcentaje del número de datos que entraron en el límite sobre el total de datos tomados en la prueba.

8.2 PRUEBA DE REPETIBILIDAD

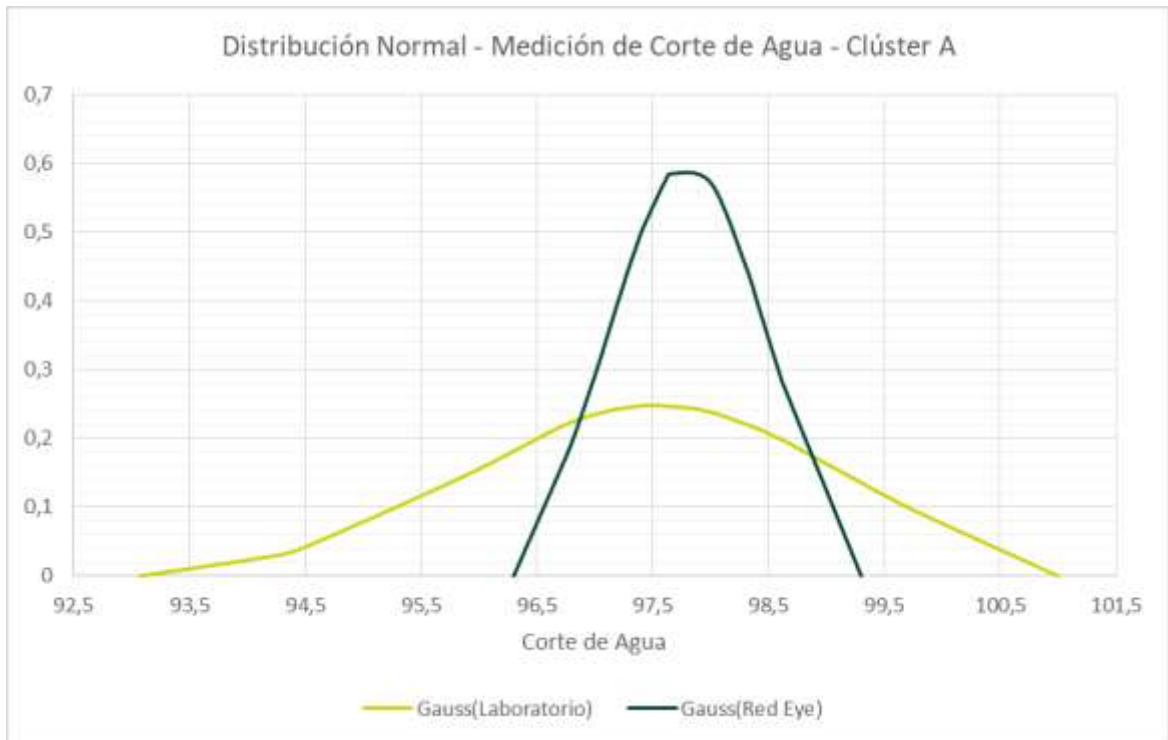
Una prueba de repetibilidad tiene como objetivo medir el grado de dispersión entre resultados de sucesivas mediciones del mismo mensurando que para este caso es el corte de agua, asegurando condiciones estables de repetibilidad tales como:

- El mismo procedimiento de medida.
- El mismo observador.
- El mismo instrumento de medida utilizado en las mismas condiciones.
- El mismo lugar.
- Repetición durante un corto periodo de tiempo (De 1 a 5 minutos).

En este caso en particular, se realizó la comparación de la medición de corte de agua por laboratorio y por el dispositivo electrónico Red Eye. A continuación se presentará los resultados obtenidos:

8.2.1 Dispersión de los datos – Clúster A Tomando muestras consecutivas de fluido del pozo en intervalos de tiempo muy cortos asegurando las condiciones de repetibilidad, se comparó los resultados de la medición de corte de agua por análisis de laboratorio y por el dispositivo electrónico Red Eye, el cual se presentará de forma gráfica en la Ilustración 43 a través de la distribución normal de los datos de laboratorio y de Red Eye:

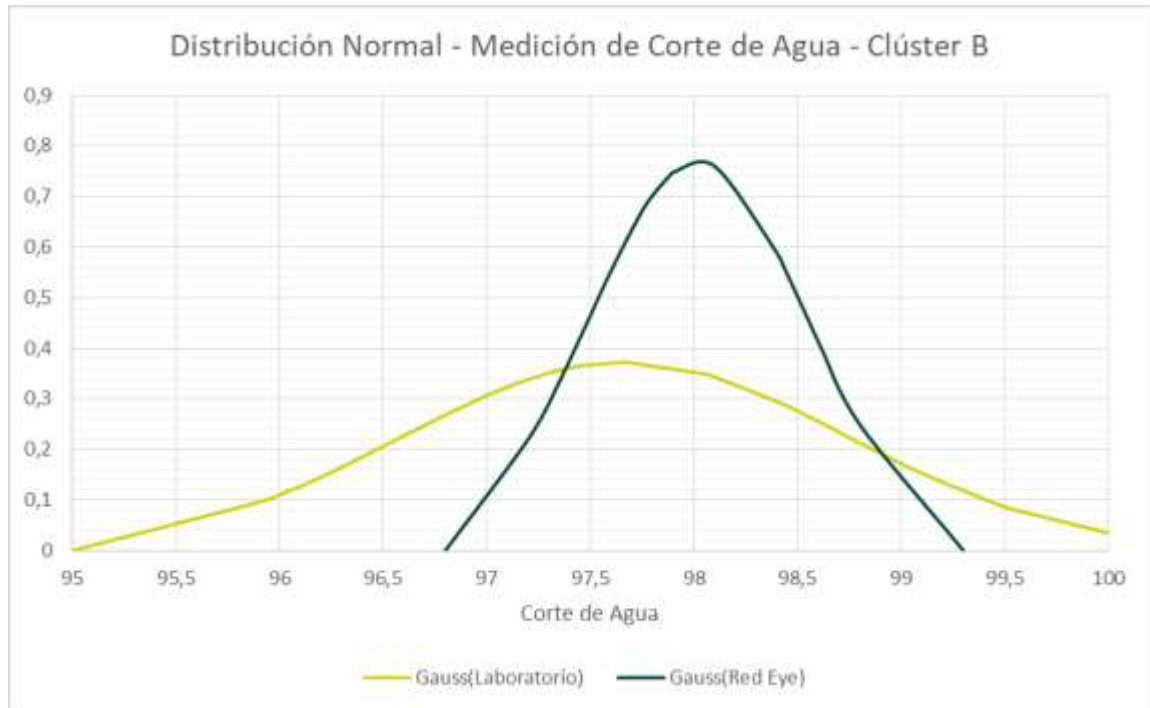
Ilustración 43: Distribución normal de medición de corte de agua – Clúster A.



Tal como se puede observar en la Ilustración 43, el grado de dispersión (desviación estándar) de los resultados de la medición con el dispositivo electrónico es mucho menor que por análisis de laboratorio, demostrando así que el medidor Red Eye tiene una mejor repetibilidad, y por ende una menor incertidumbre asociada en las condiciones del clúster A.

8.2.2 Dispersión de los datos – Clúster B Tomando muestras consecutivas de fluido del pozo en intervalos de tiempo muy cortos asegurando las condiciones de repetibilidad, se comparó los resultados de la medición de corte de agua por análisis de laboratorio y por el dispositivo electrónico Red Eye, el cual se presentará de forma gráfica en la Ilustración 44 a través de la distribución normal de los datos de laboratorio y de Red Eye:

Ilustración 44: Distribución normal de medición de corte de agua – Clúster B.



Tal como se puede observar en la Ilustración 44, el grado de dispersión (Desviación estándar) de los resultados de la medición con el dispositivo electrónico es mucho menor que por análisis de laboratorio, demostrando que el medidor Red Eye tiene una mejor repetibilidad, y por ende una menor incertidumbre asociada en las condiciones del clúster B.

8.3 ESTIMACIÓN DE INCERTIDUMBRE

Teniendo la claridad del grado de dispersión de las mediciones hechas a través de análisis de laboratorio y el dispositivo electrónico Red Eye (numeral 8.2), en este capítulo se realizará la estimación de la incertidumbre de la medición de cada uno de los métodos realizando un análisis detallado de las pruebas individuales de

repetibilidad e incluyendo como fuente adicional de incertidumbre la resolución de medida.

8.3.1 Evaluación tipo A²⁷ de la incertidumbre típica (Repetibilidad) Para el clúster A, se realizaron un total de 9 pruebas de repetibilidad, y para el clúster B un total de 8 pruebas. Se realizó el cálculo de la desviación estándar de los datos del Red Eye y de laboratorio. Los resultados se presentan en la Tabla 14 y la Tabla 15:

Tabla 14: Prueba de repetibilidad clúster A.

Prueba Repetibilidad Red Eye vs Laboratorio - Clúster A							
# Prueba	# Pozo	# Muestra	Fecha/Hora	Red Eye	Lab	σ Red Eye	σ Lab
1	1254H	1	11/10/2017 15:00	98,48	98,6	0,01	0,71
	1254H	2	11/10/2017 15:01	98,47	100		
	1254H	3	11/10/2017 15:02	98,48	99,49		
2	383 H	1	12/10/2017 10:00	96,84	97,45	0,13	1,06
	383 H	2	12/10/2017 10:01	97,01	99,51		
	383 H	3	12/10/2017 10:02	96,75	98,02		
3	1123H	1	12/10/2017 20:00	97,11	97,34	0,26	0,50
	1123H	2	12/10/2017 20:01	96,78	98,08		
	1123H	3	12/10/2017 20:02	97,29	97,13		
4	1254H	1	13/10/2017 8:00	98,61	97,52	0,01	0,25
	1254H	2	13/10/2017 8:01	98,62	97,98		
	1254H	3	13/10/2017 8:02	98,62	97,94		
5	1190H	1	13/10/2017 18:30	98,46	97,16	0,08	0,79
	1190H	2	13/10/2017 18:31	98,41	97,52		
	1190H	3	13/10/2017 18:32	98,56	98,68		
6	381H	1	14/10/2017 10:00	97,2	99,42	0,06	0,75
	381H	2	14/10/2017 10:01	97,3	98,5		
	381H	3	14/10/2017 10:02	97,2	97,94		
7	382H	1	14/10/2017 18:25	98,4	98,41	0,06	0,50
	82H	2	14/10/2017 18:26	98,3	97,42		
	382H	3	14/10/2017 18:27	98,4	97,83		
8	1123H	1	15/10/2017 8:00	97,4	96,74	0,11	0,67
	1123H	2	15/10/2017 8:01	97,41	97,19		

²⁷ Tipo de incertidumbre definida en el estándar internacional GUM "Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement", BIPM, IEC, IFCC, ISO, IUPAP, IUPAC, OIML (1995).

	1123H	3	15/10/2017 8:02	97,59	95,88		
9	1122H	1	15/10/2017 18:20	97,66	93,07	0,03	0,74
	1122H	2	15/10/2017 18:21	97,61	94,47		
	1122H	3	15/10/2017 18:22	97,66	94,18		

Tabla 15: Prueba de repetibilidad clúster B.

Prueba Repetibilidad Red Eye vs Laboratorio - Clúster B							
# Prueba	# Pozo	# Muestra	Fecha/Hora	Red Eye	Lab	σ Red Eye	σ Lab
1	1193H	1	11/10/2017 14:00	98,54	99,48	0,03	0,83
	1193H	2	11/10/2017 14:01	98,56	98,06		
	1193H	3	11/10/2017 14:02	98,51	99,52		
2	1193H	1	12/10/2017 11:00	98,45	98,56	0,01	0,73
	1193H	2	12/10/2017 11:01	98,43	100		
	1193H	3	12/10/2017 11:02	98,44	99,05		
3	628 H	1	12/10/2017 21:00	97,73	96,79	0,27	0,46
	628 H	2	12/10/2017 21:01	97,36	97,67		
	628 H	3	12/10/2017 21:02	97,89	97,02		
4	1193H	1	12/10/2017 9:35	98,61	96	0,11	0,16
	1193H	2	12/10/2017 9:36	98,62	95,92		
	1193H	3	12/10/2017 9:37	98,43	96,23		
5	658H	1	13/10/2017 21:18	98,1	97,67	0,35	0,68
	658H	2	13/10/2017 21:19	98,8	98,42		
	658H	3	13/10/2017 21:20	98,4	97,06		
6	1193H	1	14/10/2017 23:00	97,5	97,4	0,06	0,05
	1193H	2	14/10/2017 23:01	97,6	97,47		
	1193H	3	14/10/2017 23:02	97,5	97,37		
7	674H	1	15/10/2017 9:00	97,38	98,08	0,03	0,39
	674H	2	15/10/2017 9:01	97,4	97,4		
	674H	3	15/10/2017 9:02	97,35	97,42		
8	628 H	1	15/10/2017 19:15	97,9	97,06	0,38	0,11
	628 H	2	15/10/2017 19:16	97,8	97,13		
	628 H	3	15/10/2017 19:17	97,2	97,28		

De acuerdo a la Guía para la Expresión de la Incertidumbre de Medición (GUM)²⁸, desarrollando el modelo de evaluación tipo A de la incertidumbre típica, por repetibilidad, se calcula de acuerdo a la Ecuación 5 de la siguiente forma:

Ecuación 5

$$u(\text{repetibilidad}) = \frac{\text{Desviación estándar}}{\sqrt{\text{número de repeticiones}}}$$

Para cada una de las pruebas, se realizó el cálculo de incertidumbre, mencionada anteriormente, para los datos de laboratorio como para los datos del Red Eye, los resultados se presentan en la Tabla 16 y Tabla 17.

Tabla 16: Incertidumbre por repetibilidad clúster A.

Cálculo de Incertidumbre por repetibilidad - Clúster A			
# Prueba	# Pozo	u Red Eye (Repetibilidad)	u Lab (Repetibilidad)
1	1254H	0,003	0,409
	1254H		
	1254H		
2	383 H	0,076	0,614
	383 H		
	383 H		
3	1123H	0,149	0,288
	1123H		
	1123H		
4	1254H	0,003	0,147
	1254H		
	1254H		
5	1190H	0,044	0,459
	1190H		
	1190H		
6	381H	0,033	0,431
	381H		
	381H		

²⁸ Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement, BIPM, IEC, IFCC, ISO, IUPAP, IUPAC, OIML (1995).

7	382H	0,033	0,287
	82H		
	382H		
8	1123H	0,062	0,384
	1123H		
	1123H		
9	1122H	0,017	0,427
	1122H		
	1122H		

Tabla 17: Incertidumbre por repetibilidad clúster B.

Cálculo de incertidumbre por repetibilidad - Clúster B			
# Prueba	# Pozo	u Red Eye (Repetibilidad)	u Lab (Repetibilidad)
1	1193H	0,015	0,480
	1193H		
	1193H		
2	1193H	0,006	0,423
	1193H		
	1193H		
3	628 H	0,157	0,264
	628 H		
	628 H		
4	1193H	0,062	0,093
	1193H		
	1193H		
5	658H	0,203	0,393
	658H		
	658H		
6	1193H	0,033	0,030
	1193H		
	1193H		
7	674H	0,015	0,223
	674H		
	674H		
8	628 H	0,219	0,065
	628 H		
	628 H		

8.3.2 Incertidumbre por resolución del instrumento En el caso de la fuente de incertidumbre por resolución del instrumento de medición es diferente a las anteriores, ya que el valor de resolución es una característica de operación del instrumento en la cual se mide la variable objetivo que para el caso de estudio es el corte de agua.

La resolución del instrumento puede estar expresada en una escala analógica (mínima separación entre indicaciones o marcas) o digital (menor dígito significativo). En ambos casos, existe una zona donde el observador no conoce con exactitud dónde se localiza el valor medido.

Generalmente, para el caso de resolución de un instrumento (dependiendo del tipo) se le asigna una distribución rectangular ya que existe la misma probabilidad de que el valor se localice en la misma proporción hacia arriba o hacia abajo del valor real. De tal manera, la incertidumbre por resolución del instrumento se calcula de acuerdo a la Ecuación 6:

Ecuación 6

$$u(\text{resolución}) = \frac{\text{Intervalo de probabilidad}}{\sqrt{12}} = \frac{\text{Resolución del instrumento}}{\sqrt{12}}$$

29

Para el caso del análisis de laboratorio, se tomará la menor resolución de los instrumentos para la medición de corte de agua y BSW (Embudos de separación, probetas y zanahorias).

En este caso la resolución mínima es de 10ml en el embudo de separación de capacidad de 1200 ml. Es decir, que la resolución, expresada en % corte de agua

²⁹ Fórmula de incertidumbre para función de probabilidad tipo rectangular definida en el estándar internacional GUM "Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement", BIPM, IEC, IFCC, ISO, IUPAP, IUPAC, OIML (1995).

sería de 0.833% como resultado de la división de la resolución mínima del embudo (10ml) y la capacidad total (1200ml). Por lo tanto, la incertidumbre por resolución del instrumento de laboratorio sería:

$$u(\text{resolución})_{Lab} = \frac{0.833\%}{\sqrt{12}} = 0.241\%$$

Para el caso del medidor Red Eye, la resolución mínima en el display del instrumento es de 0.1% de corte de agua, por lo tanto la incertidumbre por resolución del instrumento sería:

$$u(\text{resolución})_{Red\ Eye} = \frac{0.1\%}{\sqrt{12}} = 0.028\%$$

Cabe resaltar, que esta estimación de incertidumbre es la misma para todas las pruebas, pues la resolución del instrumento de medida no cambia entre las pruebas.

8.3.3 Incertidumbre combinada Una vez que se ha identificado y cuantificado el mensurando (Corte de Agua), magnitudes de entrada y fuentes de incertidumbre (repetibilidad y resolución del instrumento), se procede a realizar una combinación de tal forma que se obtenga un valor de incertidumbre total sobre la determinación del mensurando. A continuación, en la Ecuación 7, resta aplicar la ley de propagación de incertidumbres para determinar una incertidumbre combinada³⁰:

Ecuación 7

$$uc = \text{incertidumbre combinada} = \sqrt{\sum (\text{Coeficiente de sensibilidad} \cdot \text{incertidumbre})^2}$$

³⁰ Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement, BIPM, IEC, IFCC, ISO, IUPAP, IUPAC, OIML (1995).

La multiplicación del coeficiente de sensibilidad por la incertidumbre de medida de cada variable es llamado el “aporte de incertidumbre” de cada una de las magnitudes de entrada del modelo. Es decir, la contribución de incertidumbre de cada una de las variables está dada no solo por el peso de la variable (coeficiente de sensibilidad), sino que además es función de la incertidumbre de la misma variable, por lo que el múltiplo de ambos es el aporte que tiene la variable en la estimación de incertidumbre del mensurando. Entre mayor sea el aporte, más crítica será esa variable en el estimado del mensurando, y generalmente la que se procura controlar durante la medición, debido a su considerable efecto.

Para este caso, la incertidumbre combinada será la suma de la incertidumbre de la resolución más la incertidumbre de repetibilidad, de tal manera las dos fuentes de incertidumbre (Repetibilidad y resolución) aportan de igual manera, por lo tanto el coeficiente de sensibilidad para cada fuente de incertidumbre es uno (1)³¹.

8.3.4 Incertidumbre expandida La incertidumbre combinada (uc) representa un intervalo centrado en el menor estimado del mensurando que contiene el valor verdadero con una probabilidad de 68% aproximadamente, bajo la suposición de que los posibles valores del mensurando siguen una distribución normal.

Generalmente se desea una probabilidad mayor, lo que se obtiene expandiendo el intervalo de incertidumbre por un factor k , llamado factor de cobertura. A continuación en la Ecuación 8 se presenta el resultado que se llama incertidumbre expandida U :

³¹ Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement, BIPM, IEC, IFCC, ISO, IUPAP, IUPAC, OIML (1995).

Ecuación 8

$$U = k \cdot uc$$

Para este caso, se tomará un valor de $k = 3$, que corresponde un nivel de confianza de 99%³².

A continuación, en la Tabla 18 y Tabla 19 se presentará el valor de incertidumbre expandida para cada prueba realizada en los clúster A y B:

Tabla 18: Incertidumbre expandida - clúster A.

Estimación de Incertidumbre - Clúster A						
# Prueba	# Pozo	u Red Eye (Combinada)	u Lab (Combinada)	Factor de confianza 99%	u Red Eye (Expandida)	u Lab (Expandida)
1	1254H	0,029	0,475	3	0,087	1,424
	1254H					
	1254H					
2	383 H	0,082	0,660	3	0,245	1,979
	383 H					
	383 H					
3	1123H	0,152	0,375	3	0,456	1,126
	1123H					
	1123H					
4	1254H	0,029	0,282	3	0,087	0,846
	1254H					
	1254H					
5	1190H	0,053	0,518	3	0,158	1,553
	1190H					
	1190H					
6	381H	0,044	0,494	3	0,132	1,482
	381H					
	381H					
7	382H	0,044	0,375	3	0,132	1,124
	82H					
	382H					
8	1123H	0,068	0,453	3	0,204	1,360
	1123H					

³² Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement, BIPM, IEC, IFCC, ISO, IUPAP, IUPAC, OIML (1995).

	1123H					
9	1122H	0,033	0,490	3	0,100	1,469
	1122H					
	1122H					

Tabla 19: Incertidumbre expandida - clúster B.

Estimación de Incertidumbre - Clúster B						
# Prueba	# Pozo	u Red Eye (Combinada)	u Lab (Combinada)	Factor de confianza 99%	u Red Eye (Expandida)	u Lab (Expandida)
1	1193H	0,032	0,537	3	0,097	1,611
	1193H					
	1193H					
2	1193H	0,029	0,486	3	0,088	1,459
	1193H					
	1193H					
3	628 H	0,160	0,357	3	0,479	1,070
	628 H					
	628 H					
4	1193H	0,068	0,258	3	0,204	0,773
	1193H					
	1193H					
5	658H	0,205	0,461	3	0,614	1,383
	658H					
	658H					
6	1193H	0,044	0,242	3	0,132	0,727
	1193H					
	1193H					
7	674H	0,032	0,328	3	0,097	0,985
	674H					
	674H					
8	628 H	0,220	0,249	3	0,661	0,747
	628 H					
	628 H					

Por último, se realizó el promedio de la incertidumbre expandida de laboratorio y Red Eye de cada prueba realizada para los dos clúster A y B, teniendo los siguientes resultados presentados en la Tabla 20 y la Tabla 21:

Tabla 20: Incertidumbre expandida promedio - clúster A.

Clúster A	
u Red Eye (Expandida) %	u Lab (Expandida) %
0,178	1,374

Tabla 21: Incertidumbre expandida promedio - clúster B.

Clúster B	
u Red Eye (Expandida) %	u Lab (Expandida) %
0,297	1,094

Tal como se puede observar, se logró una reducción de la incertidumbre de la medición de corte de agua aplicando la estrategia de mejora propuesta del 87% en el clúster A con respecto al método actual de laboratorio y del 73% en el clúster B con respecto a la medición actual por laboratorio, demostrando así el éxito de la prueba piloto. Esta diferencia en la reducción de la incertidumbre en el clúster A y el clúster B se debe a la diferencia en la de instalación del Red Eye, que en el clúster A fue tipo horizontal con mezclador estático y en el clúster B fue vertical sin mezclador estático.

9. CONCLUSIONES

- Se logró probar con éxito una tecnología de medición de corte de agua en tiempo real de baja incertidumbre en el campo en Estudio que permitirá tener mejor información para toma de decisiones de control de producción tales como activación y cierre de pozos para optimizar producción y rentabilidad, identificar variaciones de corte de agua en los pozos de forma oportuna para evitar saturaciones de las facilidades de tratamiento de agua de superficie, mejorar la precisión la toma de decisiones de abandono de pozos y por ende evitar pérdida de reservas.
- El diagnóstico del estado actual del proceso de medición de corte de agua contribuyó en la identificación inicial de las oportunidades de mejora para la reducción de fuentes de incertidumbre en los clúster A y B del Campo en Estudio.
- El ejercicio de validación de las recomendaciones de normas y estándares internacionales API MPMS 8.2 y API MPMS 20.1 de Medición permitió complementar las oportunidades de mejora identificadas inicialmente y así robustecer la estrategia propuesta de reducción de incertidumbre de la medición de corte de agua para el campo en Estudio.
- El análisis comparativo de las tecnologías de medición en línea de corte de agua existentes en el mercado logró identificar y acotar las tecnologías aplicables a los clúster A y B del Campo en Estudio, y así reducir tiempos de reproceso por la selección aleatoria de tecnologías para las pruebas piloto, seleccionando la tecnología de absorción de infrarrojos porque fue la que cumplió todos los requisitos definidos para asegurar su aplicabilidad dadas las condiciones de proceso específicas del Campo en Estudio.

- Se logró elaborar una estrategia integral que consiste en el aseguramiento de muestras representativas, una apropiada liquidación volumétrica y de corte de agua con base en recomendaciones de estándares internacionales y la implementación de tecnologías de medición en tiempo real que permite la mejora exitosa (reducción de la incertidumbre) de medición de corte de agua para las pruebas de pozo de los clúster A y B del Campo en Estudio con base en los resultados del diagnóstico, validación de estándares internacionales y pruebas piloto de tecnologías.
- La implementación de la estrategia logró la reducción de la incertidumbre de medición de corte de agua para las pruebas del 87% en el clúster A y del 73% en el clúster B con respecto al método actual de muestreo puntual y análisis de laboratorio.
- La instalación del medidor tipo horizontal con mezclador estático utilizada en el clúster A es la más conveniente para el Campo en Estudio, pues logró una mayor reducción de la incertidumbre con respecto a la instalación tipo vertical sin mezclador estático del clúster B.

10.RECOMENDACIONES

- Realizar pruebas de 24 horas continuas de los pozos de los clúster A y B, con el objetivo de observar su comportamiento en tiempo real, y así validar su variabilidad real.
- Realizar Caso de Negocio para la implementación de Red Eye para el Campo en Estudio, teniendo en cuenta todos los beneficios directos e indirectos (tales como activación y cierre de pozos para optimizar producción y rentabilidad, identificar variaciones de corte de agua en los pozos de forma oportuna para evitar saturaciones de las facilidades de tratamiento de agua de superficie, mejorar la precisión la toma de decisiones de abandono de pozos y por ende evitar pérdida de reservas)

BIBLIOGRAFÍA

Akram Karimi, Muhammad. Low cost and conformal microwave water-cut sensor for optimizing oil production process. Thuwal, Kingdom of Saudi Arabia, 87. Thesis for the Degree of Master of Science. King Abdullah University of Science and Technology. 2015.

F. Engineering, 2003. [Online]. Available: <http://imistorage.blob.core.windows.net/imidocs/99123p001%20framo%20multiphase%20flowmeters%20-%20phasewatcher%20vx.pdf>.

M. Babelli, "IN SEARCH OF AN IDEAL MULTIPHASE FLOW METER FOR THE OIL INDUSTRY," *ARABIAN JOURNAL FOR SCIENCE AND ENGINEERING*, 2002.

Sandau , Court. Waddell, Jevins . Berthelet , Remi Anthony . Novel Approach To High Water Cut Measurement In A Mature Oil Field. On Line. 7th of May 2017. Available in: https://www.onepetro.org/conference-paper/SPE-117354-MS?sort=&start=0&q=spe+117354&from_year=&peer_reviewed=&published_between=&fromSearchResults=true&to_year=&rows=10#

Weatherford, "Red Eye 2G Water-Cut Meter," [Online]. Available: <http://www.weatherford.com/doc/wft096551>.

Xiao, Jinjiang. Determining Water Volume Fraction for Oil-Water Production with Speed of Sound Measurement. On line. 7th of May 2017. Available in: <http://www.saudiaramco.com/content/dam/Publications/Journal-of-Technology/Summer2015/JOT-Summer-2015-Art11.pdf>

ZelenTech, "How to select a watercut monitor," ZelenTech, 7 November 2011. [Online]. Available: <http://www.zelentech.co/blog/posts/how-to-select-a-watercut-monitor/>.