



**ADECUACIÓN DEL EQUIPO SLIM-TUBE DEL LABORATORIO DE
OPTIMIZACIÓN DE PRODUCCIÓN & RECOBRO MEJORADO DEL CENTRO
DE INNOVACIÓN Y TECNOLOGÍA (ICP)**

CRISTIAN ANDRÉS ZULUAGA BLANCO 1102378952

**UNIDADES TECNOLÓGICAS DE SANTANDER
FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES E INGENIERÍA
INGENIERÍA ELECTROMECÁNICA
BUCARAMANGA
05-12-2019**



**ADECUACIÓN DEL EQUIPO SLIM-TUBE DEL LABORATORIO DE
OPTIMIZACIÓN DE PRODUCCIÓN & RECOBRO MEJORADO DEL CENTRO
DE INNOVACIÓN Y TECNOLOGÍA (ICP)**

CRISTIAN ANDRÉS ZULUAGA BLANCO 1102378952

**Trabajo de Grado para optar al título de
INGENIERO ELECTROMECAÁNICO**

**DIRECTOR
M Sc CARLOS G. CÁRDENAS A.**

GRUPO DE INVESTIGACIÓN EN DISEÑO Y MATERIALES (DIMAT)

**UNIDADES TECNOLÓGICAS DE SANTANDER
FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES E INGENIERÍA
INGENIERÍA ELECTROMECAÁNICA
BUCARAMANGA
05-12-2019**

Nota de Aceptación

Firma del jurado

Firma del Jurado

DEDICATORIA

Dedicamos este proyecto a nuestro Padre Celestial, gracias Dios nuestro por la providencia de poder realizar los estudios correspondientes, por el favor para desarrollarlos y la gracia para concluirlos.

A nuestros padres y tutores mil gracias, por su apoyo incondicional y la constancia en el día a día, por su apoyo económico y emocional, lo cual nos dio la fuerza para continuar a pesar de los tropiezos y lo difícil que fuese.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a los docentes que nos guiaron en la carrera, gracias por el conocimiento que nos brindaron en cada asignatura.

Un agradecimiento especial al Ingeniero Carlos G. Cárdenas A., por la asesoría en el proyecto presentado.

Agradecimientos al equipo de trabajo del Laboratorio de recobro mejorado, Omar López, Jeison Quintero, Cesar Bueno & Kelly Colmenares, sus conocimiento y gran experiencia permitió lograrlo con calidad y excelencia.

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN EJECUTIVO	12
<u>1 DESCRIPCIÓN DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN</u>	<u>14</u>
1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	14
1.2 JUSTIFICACIÓN.....	15
1.3 OBJETIVOS.....	16
1.3.1 OBJETIVO GENERAL	16
1.3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	16
1.4 ESTADO DEL ARTE	17
<u>2 MARCOS REFERENCIALES</u>	<u>18</u>
2.1 MARCO CONCEPTUAL	18
2.1.1. RECUPERACIÓN MEJORADA DE PETRÓLEO “ENCHANGED RECOVERY OIL”	18
2.1.2. MISCIBILIDAD.....	18
2.1.3. TENSIÓN INTERFACIAL (IFT)	18
2.1.4. DESPLAZAMIENTO MISCIBLE	19
2.1.5. PRESIÓN MÍNIMA DE MISCIBILIDAD (MMP) “MINIMUM MISCIBILITY PRESSURE (MMP)”	19
2.1.6. EXPERIMENTO DE TUBO DELGADO “SLIM-TUBE TEST”	19
2.1.7. INYECCIÓN DE DIÓXIDO DE CARBONO (CO ₂)	19
2.1.7.1. PROPIEDADES FÍSICAS DEL CO ₂	19
2.1.7.2. FUENTES DE CO ₂	20
2.1.7.3. METODOS DE INYECCION	20
2.1.8. DETERMINACIÓN DE PRESIÓN MÍNIMA DE MISCIBILIDAD (MMP)	22
2.1.8.1. FUNCIÓN DEL SLIM-TUBE POR CORE-LABORATORIES	22
2.1.9. COMPONENTES DEL EQUIPO SLIM-TUBE.....	26
2.1.9.1. TUBO DE VIDRIO CAPILAR “SIGHT GLASS”	26
2.1.9.2. CAMARA DE SEPARACIÓN DE GAS/LIQUIDO “SEPARATOR”	27
2.1.9.3. REGULADOR DE CONTRAPRESIÓN BPR	28

3 DESARROLLO DEL TRABAJO DE GRADO..... 29

3.1. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA 30

3.1.1. INFORMACIÓN Y ANTECEDENTES DEL EQUIPO 30

3.1.2. DESCRIPCIÓN GENERAL 32

3.1.3. FUNCIONAMIENTO 33

3.1.4. EQUIPOS PERIFÉRICOS ASOCIADOS AL SLIM-TUBE PARA SU ADECUADO FUNCIONAMIENTO Y OPERACIÓN..... 39

3.2. DIAGNÓSTICO DEL ESTADO ACTUAL DEL EQUIPO 42

3.2.1. DIAGNÓSTICO 42

3.3. PROPUESTA DE DISEÑO O ADECUACIÓN 50

3.3.1. SOLICITUD DEL USUARIO 50

3.3.2. PROPUESTAS EN EL DISEÑO 51

3.3.3. PLANOS 51

3.4. INSTALACIÓN DEL EQUIPO SLIM-TUBE 54

3.4.1. SLIM TUBE (TUBO DELGADO) 54

3.4.1.1. GEOMETRÍA 54

3.4.1.2. MATERIAL 55

3.4.1.3. CORTE DE TUBING 56

3.4.1.4. MONTAJE DE FÉRULAS Y CONTRA FÉRULAS..... 58

3.4.1.5. CONSTRUCCIÓN Y ENSAMBLAJE 59

3.4.2. TOMA MUESTRAS 60

3.4.2.1. DOBLADO DE TUBING 61

3.4.3. BANCO DE PRESIÓN DIFERENCIAL..... 62

3.4.4. BACK PRESSURE..... 64

3.5 INSTRUCTIVO DE OPERACIÓN..... 65

3.5.1 VALORACIÓN RAM..... 65

3.5.2 PELIGROS 65

3.5.3 RIESGOS..... 66

3.5.4 CONTROLES DE SEGURIDAD 66

3.5.5 EQUIPO PERSONAL DE PROTECCIÓN EPP'S 66

3.5.6 EQUIPOS Y MATERIALES..... 67

3.5.7 OPERACIÓN DEL EQUIPO SLIM TUBE..... 67

3.6. PRUEBAS PRELIMINARES..... 81

3.6.1. PRUEBA #1..... 81

3.6.2. PRUEBA #2..... 82

3.6.3. PRUEBA #3..... 83

3.6.4. PRUEBA #4..... 84

4	RESULTADOS.....	85
5	CONCLUSIONES	87
6	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	88
7	ANEXOS	90
7.1	ANEXO A: METODOLOGÍA PARA EMPAQUETADO Y DESEMPAQUETADO DE TUBING	90
7.1.1	EMPAQUETADO DE TUBINGS PARA EL MONTAJE DEL SLIM TUBE.....	90
7.1.1.1	PROCEDIMIENTO MANUAL	90
7.1.1.2	PROCEDIMIENTO CON MAQUINA COMPACTADORA	94
7.1.2	LIMPIEZA O DESEMPAQUETAMIENTO DE TUBING	96
7.2	ANEXO B: ESPECIFICACIONES DE INSUMOS.....	100
7.3	ANEXO C: PLANOS SLIM TUBE MONTAJE PRUEBA CDG	113
7.4	ANEXO D: AVANCE PLANOS SLIM TUBE VERSION 2020	116
7.5	ANEXO E: MEJORAS PROPUESTAS	119

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Diagrama de fase del Dioxido de Carbono.....	20
Figura 2. Sistema de inyección de CO2 y agua	21
Figura 3. Esquema del Experimento Slim-Tube o Tubo delgado	24
Figura 4. Slim Tube System (STS 700) por Vinci Technologies Lab.....	25
Figura 5. Tubo Capilar de vidrio por Vinci Technologies Lab	27
Figura 6. Separador por Vinci Technologies Lab	27
Figura 7. Tubo Capilar de vidrio por Vinci Technologies Lab	28
Figura 8. Fases del proyecto.....	29
Figura 9. Análisis Roca-Fluido.....	30
Figura 10. Anterior Equipo Slim-Tube	31
Figura 11. Esquema general del Equipo Slim-Tube	33
Figura 12. Proceso del ensayo experimental con CDG.....	34
Figura 13. Ejemplo Grafica de Diferencia de Presión.....	35
Figura 14. Ejemplo Grafica de Permeabilidad.....	36
Figura 15. Esquema del equipo Slim-Tube para mediciones experimentales de la presión de miscibilidad	37
Figura 16. Grafica Presión vs Porcentaje de recobro.....	38
Figura 17. Esquema solicitado	50
Figura 18. Propuesta de Diseño.....	52
Figura 19. Diseño CAD Equipo Slim-Tube, (a) Vista Isométrica (b) Vista Frontal .	53
Figura 20. Geometría SlimTube	55
Figura 21. Posibles materiales SlimTube	56
Figura 22. Herramienta de corte.....	57
Figura 23. Posición de corte.....	57
Figura 24. Instalación de sellos de tubing	58
Figura 25. Ensamble final Slim Tube.....	59
Figura 26. Ensamble Toma muestras	60
Figura 27. Montaje de Toma muestras.....	60
Figura 28. Herramienta dobladora de tubing.....	61
Figura 29. Montaje Banco de Medición de Presión	62
Figura 30. Montaje BPR	64
Figura 31. Preparación de Salmuera.....	69
Figura 32. Máquina Agitadora	70
Figura 33. Viscosímetro	71
Figura 34. Desmontaje y limpieza de cilindros	73
Figura 35. Curva característica de arenas	74
Figura 36. Regresión polinómica.....	75

Figura 37. Empaquetado de tubing	76
Figura 38. Instrumentación de medición SMAR	77
Figura 39. Pantalla de inicio OPTO 22	78
Figura 40. Panel de adquisición de datos para el Equipos SimTube	80
Figura 41. Comportamiento de la presión Prueba #1	81
Figura 42. Comportamiento de la presión Prueba #2	82
Figura 43. Comportamiento de la presión Prueba #3	83
Figura 44. Comportamiento de la presión Prueba #4	84
Figura 45. Montaje equipo Slim Tube	85
Figura 46. Montaje equipo Slim Tube	86
Figura 47. Corte de malla de filtración	90
Figura 48. Postura de malla de filtración en tubing	91
Figura 49. Postura de unión reductora en tubing	91
Figura 50. Tipos de arena y disposición del llenado de tubing	91
Figura 51. Compactado de tubing	92
Figura 52. Llenado total del tubing a cada centímetro	92
Figura 53. Comprobación de correcto sellado de tubing	93
Figura 54. Montaje del tubing en la zaranda	94
Figura 55. Máquina compactadora	96
Figura 56. Secado de arena del tubing en horno DiEs	97
Figura 57. Montaje del tubing en la zaranda	97
Figura 58. Raspado de arena en el extremo del tubing	98
Figura 59. Montaje del tubing en la zaranda para desempaqueado	98
Figura 60. Desempaquetamiento sobre superficie plana	99
Figura 61. Limpieza del desempaqueado	99
Figura 62. Especificaciones Horno	100
Figura 63. Especificaciones tubería PVC	101
Figura 64. Especificaciones tubería de acero inoxidable	102
Figura 65. Especificaciones accesorios Swalegok	103
Figura 66. Panel de Configuración	119
Figura 67. Programación LabVIEW	120
Figura 68. Conexión del controlador (Arduino)	121
Figura 69. Comportamiento DP	121

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Especificaciones Slim Tube System (STS 700)	25
Tabla 2. Ficha Técnica anterior Slim Tube	32
Tabla 3. Ficha Técnica Bomba desplazamiento Positivo ISCO.....	39
Tabla 4. Ficha Técnica Horno DiEs TH720	40
Tabla 5. Ficha técnica Sensor de Presión LD301	41
Tabla 6. Inventario Slim Tube InHouse	42
Tabla 7. Suministros complementarios Slim Tube definitivo	48
Tabla 8. Suministros adicionales para pruebas de MMP	49
Tabla 9. Escalamiento de variables.....	120

RESUMEN EJECUTIVO

En el último siglo la industria petrolera colombiana ha venido presentando falencias en las reservas de crudo existentes ya que su extracción se ha venido afectando por que se han encontrado con hidrocarburos cada vez más pesados y por lo tanto estos tratan de resistirse a salir a la superficie de forma natural. Por tal motivo, se ha dado paso al uso de nuevas técnicas de extracción como son el recobro y el recobro mejorado. El presente proyecto se enmarca en las nuevas técnicas aplicadas para la extracción de crudo actuales. El objetivo principal de este trabajo es adecuar el equipo Slim-Tube de acuerdo con los requerimientos de diseño y operación.

Equipo Slim-Tube permite realizar análisis de desplazamiento a través de material poroso inyectando una sustancia (aire, vapor, químicos) el crudo en forma de mezcla y luego ser tratado para su obtención final.

Para realizar esta tarea se han llevado a cabo una serie de actividades. Primero, se consultaron y estudiaron los manuales de operación del equipo, se identificaron sus partes principales, se elaboró una lista de los elementos necesarios y se apoya el seguimiento en la adquisición de estos. Segundo, se instalará y adecuará la totalidad del equipo, seguido se ejecutarán pruebas preliminares, monitoreo de variables y cálculos de incertidumbre.

Finalmente, se presentará un instructivo sobre el equipo detallando la forma de operación, manejo, mantenimientos rutinarios, cuidado básico y panorama de riesgos HSE.

La finalidad del trabajo es dar avances tecnológicos en temas de optimización de extracción de hidrocarburos con los análisis que se van a generar realizando pruebas experimentales con el Equipo Slim-Tube.

PALABRAS CLAVE. Inventarios, adecuación de equipos, recobro, recuperación mejorada, Slim-tube.

INTRODUCCIÓN

El Equipo Slim tube es un instrumento empleado para realizar pruebas de presión mínima de miscibilidad, permeabilidad y para predecir en un porcentaje el comportamiento de los fluidos inyectados en el medio poroso a escala de yacimiento.

El laboratorio de Recobro Mejorado cuenta con un equipo Slim tube que se encontraba desmantelado, en proceso de consecución de partes faltantes y con órdenes de trabajo abiertas. La finalidad de este trabajo es soportar el proceso de adecuación teniendo en cuenta los requerimientos funcionales para la realización de pruebas experimentales. Con la realización de este trabajo se espera que el equipo funcione en las mejores condiciones y sea un punto de inicio a la implementación de mejores herramientas y al montaje de diversas pruebas para analizar otros parámetros más importantes en el área de recobro mejorado.

El presente documento expone el desarrollo de la puesta a punto del Equipo Slim Tube. El informe está organizado de la siguiente manera: primero se realiza una búsqueda y revisión de bases documentales para entender el funcionamiento del equipo. Posteriormente, se elabora un inventario y se analizan las condiciones de funcionamiento de cada pieza, con esta información, se propone una línea de diseño optimizando recursos y dimensionamiento. Luego de la instalación, armado y acondicionamiento de las partes faltantes, se valida su operatividad realizando pruebas a nivel de laboratorio. Por último, se realiza el instructivo de operación donde se detallada un protocolo de montaje de pruebas para cualquier tipo de muestras teniendo en cuenta los riesgos presentes y cuidados básicos.

1 DESCRIPCIÓN DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN

1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Los avances tecnológicos actuales nos permiten desarrollar estudios que logran comprobar si los equipos mantienen las condiciones de seguridad y operación adecuadas, por lo tanto, el deterioro, avería o desconfiguración son una problemática que se presenta constantemente debido al desgaste natural de los componentes o el manejo inadecuado de los mismos originando una orden de tareas a realizar de mantenimiento y documentación con el fin de obtener una adecuación en base a su funcionamiento y por el cual fue destinado, posteriormente validando la puesta en marcha de los equipos intervenidos.

Debido a lo mencionado anteriormente la pregunta planteada para la investigación a realizar es ¿Cómo lograr desarrollar un correcto proceso de adecuación de equipos de laboratorio con el fin de validar su correcto funcionamiento y operación para la realización de pruebas preliminares en el Equipo Slim-Tube en el área de optimización y recobro mejorado del Instituto Colombiano de Petróleo, como medio de adquisición de conocimiento teórico y práctico?

El presente desarrollo tecnológico a desarrollar incluye el estudio de manuales del Equipo Slim-Tube como también de sus componentes, con lo cual se logra efectuar procedimientos que conlleven a la puesta a punto del mismo para lograr realizar pruebas de validación de funcionamiento para análisis de la presión mínima de miscibilidad teniendo determinado las condiciones de los diferentes yacimientos.

1.2 JUSTIFICACIÓN

La realización del presente desarrollo tecnológico permite generar conocimiento en varios aspectos, por un lado, el desarrollo de una serie de tareas que promueven la adecuación de equipos de laboratorio para emplear pruebas de miscibilidad en el equipo Slim-Tube, por otra parte, genera conocimiento en cuanto a funcionamientos y operatividad del equipo de presión, horno de calentamiento, Slim-tube, regulador de contrapresión, acumuladores de pistón flotante, separador y los análisis de miscibilidad, y por último, la experiencia en temas de presupuesto, cotización y elaboración de informes de laboratorio.

La ejecución del desarrollo permite realizar un correcto proceso de adecuación de equipos de laboratorio, basado en la teoría, según la evaluación de funcionalidad de los diferentes componentes para su utilización, describiendo e identificando piezas faltantes y otras no funcionales, este proceso se basa en el montaje y puesta en marcha de los equipos en conjunto debido a que estos presentan diferentes características operacionales el fin que fue diseñado, de este modo, conociendo la necesidad de los parámetros como lo son condiciones que debe soportar y también tener presente su dimensionamiento, se identifica el tipo de equipo que se requiere por medio de catálogos o cotizaciones, con lo que se selecciona el adecuado, viable y que se ajuste al equipo y se obtiene la terminación de este con la funcionalidad y operatividad deseada.

Con la realización de este desarrollo se genera un aporte significativo a la investigación de recuperación mejorada del Instituto Colombiano de Petróleo de Piedecuesta, también se genera una contribución a la formación del profesional de las Unidades Tecnológicas de Santander en el cual se evidenciará su progreso por la experiencia vivida en la marcha del presente desarrollo tecnológico brindándole más capacidades enfocadas a la viabilidad, montaje, análisis y cálculo de los campos del conocimiento asociadas al Equipo Slim-Tube.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 *Objetivo general*

Adecuar el Equipo Slim-Tube evaluando su estado actual y acondicionando sus componentes para mejorar la disponibilidad del mismo en las áreas operativas del laboratorio de Optimización De Producción & Recobro Mejorado del Centro de innovación y Tecnología (ICP).

1.3.2 *Objetivos específicos*

- Revisar manuales de operación, funcionamiento, mantenimientos y especificaciones técnicas del equipo para de esta manera comprender las características generales del mismo.
- Diagnosticar el estado actual del Equipo Slim-Tube realizando una lista de los elementos que lo componen y haciendo pruebas funcionales de los mismos si se requiere.
- Desarrollar el diseño planteado para el equipo, instalando y realizando el montaje de los componentes identificados, dando paso a los ensayos preliminares y pruebas de laboratorio.
- Desarrollar un protocolo del correcto manejo y uso del Equipo Slim-Tube, como también sobresaltar los componentes críticos, mantenimientos preventivos y análisis del panorama de riesgos HSE para este cambio de tecnología según los parámetros del Instituto Colombiano de Petróleo.

1.4 ESTADO DEL ARTE

Se presenta a continuación dos trabajos relacionados directamente con el equipo Slim Tube, uno de ellos consiste en la adecuación del mismo para hacer pruebas experimentales, y el siguiente lo utilizan para realizar análisis de movilidad en yacimiento.

Naranjo, Eduardo; Bottia, Hernando; Herrera, Julia; Rueda, Alberto. (2017). Estimación de la mínima presión de miscibilidad en las arenas basales del campo Colombia en paz. (Naranjo Suárez, Bottia Ramírez, Herrera Quintero, & Rueda Suárez, 2017). Este proyecto tuvo como objetivo principal cuantificar la eficiencia de desplazamiento de crudo por la inyección de gas de producción en el equipo Slim Tube, como primer paso consistió en la adecuación y puesta a punto del equipo Slim Tube y a su vez se realizaba la preparación y caracterización de los fluidos tanto crudo como gas, con el equipo ya operativo se establecieron las condiciones de temperatura, presión y número de ensayos a realizar. El proyecto obtuvo resultados de eficiencia de desplazamiento de crudo con gas de alrededor de un 18%, el cual se determinó inviable la implementación de este método en las arenas basales del campo Colombia en paz.

La Universidad Industrial de Santander UIS, la facultad de ingenierías fisicoquímicas de la escuela de ingeniería de petróleos en Bucaramanga el estudiante Rubén Hernán Castro García realiza un estudio en temas de recobro mejorado utilizando la técnica de inyección de geles de dispersión coloidal (CDG) para incrementar la eficiencia de barrido volumétrico en los yacimientos, para llevar a cabo este estudio se realizaron diseños de pruebas experimentales de desplazamiento y movilidad en los equipos Coreflooding y Slim Tube, en el documento muestra análisis del comportamiento del sistema CDG en términos de factores de resistencia (RF & RRF) evaluando la eficiencia, permitiendo determinar si la implementación de este proceso reúne las condiciones más favorables para su utilización, estableciendo así un análisis de viabilidad y dando un aporte en inyección de sistemas CDG. (Castro García, 2011)

2 MARCOS REFERENCIALES

A continuación, se presentan los marcos referenciales del proyecto, en los cuales se describe el contenido referente necesario para la comprensión del proyecto desarrollado.

2.1 MARCO CONCEPTUAL

El marco conceptual del proyecto se presenta en este apartado, cada uno de las definiciones relevantes para la comprensión del proyecto desarrollado.

2.1.1. Recuperación mejorada de petróleo “Enhanced Recovery Oil”

Se entiende por recuperación mejorada (EOR de su abreviatura en inglés) o recuperación terciaria a métodos para mejorar la recuperación de petróleo que usa técnicas sofisticadas que alteran las propiedades originales del petróleo. Clasificadas alguna vez como una tercera etapa de la recuperación de petróleo que se efectuaba después de la recuperación secundaria, las técnicas empleadas durante la recuperación mejorada de petróleo pueden realmente iniciarse en cualquier momento durante la vida productiva de un yacimiento de petróleo. Su propósito no es solamente restaurar la presión de la formación, sino también mejorar el desplazamiento del petróleo o el flujo de fluidos en el yacimiento. (SCHLUMBERGER, s.f.)

2.1.2. Miscibilidad

Es una propiedad que establece una condición de tensión interfacial igual a cero entre fluidos formándose con esto una fase homogénea a una presión y temperatura específicas. Si dos fluidos son altamente miscibles se necesita menos energía para que ellos formen una sola fase. (Marin Gonzalez, 2002)

2.1.3. Tensión interfacial (IFT)

Una propiedad de la interfaz entre dos fases inmiscibles. Cuando ambas fases son líquidas se denomina tensión interfacial: La tensión interfacial es la energía de Gibbs por unidad de área de interfaz a temperatura y presión fijas. (Schlumberger, s.f.)

2.1.4. Desplazamiento miscible

El desplazamiento miscible implica que, con la tensión interfacial entre el aceite y el fluido desplazante eliminando ($IFT = 0$), la saturación residual de aceite se reducirá a cero en la zona barrida. Existen básicamente dos tipos de desplazamiento miscible al primer contacto y multicontacto o contacto múltiple. (Jiménez Santiago & Hernández Jiménez, 2009)

2.1.5. Presión mínima de miscibilidad (MMP) “minimum miscibility pressure (MMP)”

Es un parámetro clave ya que es la menor presión a la cual el gas de inyección y el crudo de un yacimiento pueden llegar a ser miscibles a través de procesos por múltiples contactos, existiendo transferencia de masa entre la fase líquida (crudo) y la fase gaseosa (gas de inyección) a una temperatura específica. (Chávez Bonilla, 2012)

2.1.6. Experimento de tubo delgado “Slim-Tube test”

Su principal fin el cual se realiza este experimento es para determinar la presión mínima de miscibilidad (MMP) el cual debe inyectarse el dióxido de carbono para que este forme una mezcla miscible con el crudo y estos puedan desplazarse fácilmente por los poros para posteriormente llegar hacia la superficie.

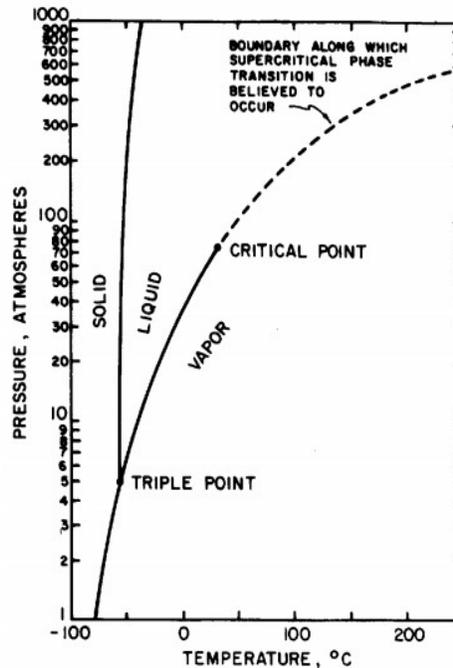
2.1.7. Inyección de Dióxido de Carbono (CO₂)

El dióxido de carbono (CO₂) se ha usado como método de recobro mejorado por más de cincuenta y cinco años. Datos experimentales y de campo han mostrado los procesos para trabajar, con incrementos de recobro siendo tan altos como 22 por ciento del petróleo original en sitio. (Brock y Bryan 1989).

2.1.7.1. Propiedades físicas del CO₂

El dióxido de carbono es un gas incoloro, inodoro, inerte y no combustible. Tiene un peso molecular de 44.01, que es una vez y media más alto que el del aire y es sólido a bajas temperaturas y presiones. El dióxido de carbono sólido (hielo seco) se evapora directamente a gas a -78.5 C (-110.7 ° F) y se usa principalmente como refrigerante. Al aumentar la presión, la fase líquida aparece por primera vez y coexiste con las fases sólida y de vapor en el punto triple. (Carcoana, 1992)

Figura 1. Diagrama de fase del Dioxido de Carbono



Fuente: *Book Applied Enhanced Oil Recovery*

2.1.7.2. Fuentes de CO2

Debido a la fase en la que se encuentra el desarrollo de estos proyectos en México, se busca que la fuente de CO₂ se encuentre a corta distancia para disminuir los costos de transporte. Dependiendo de los procesos industriales que se lleven a cabo en dichas fuentes estacionarias se tendrán diferentes concentraciones de este gas y contaminantes, por lo cual se requiere de un proceso de captura y separación del CO₂ (Santamaría Guzmán)

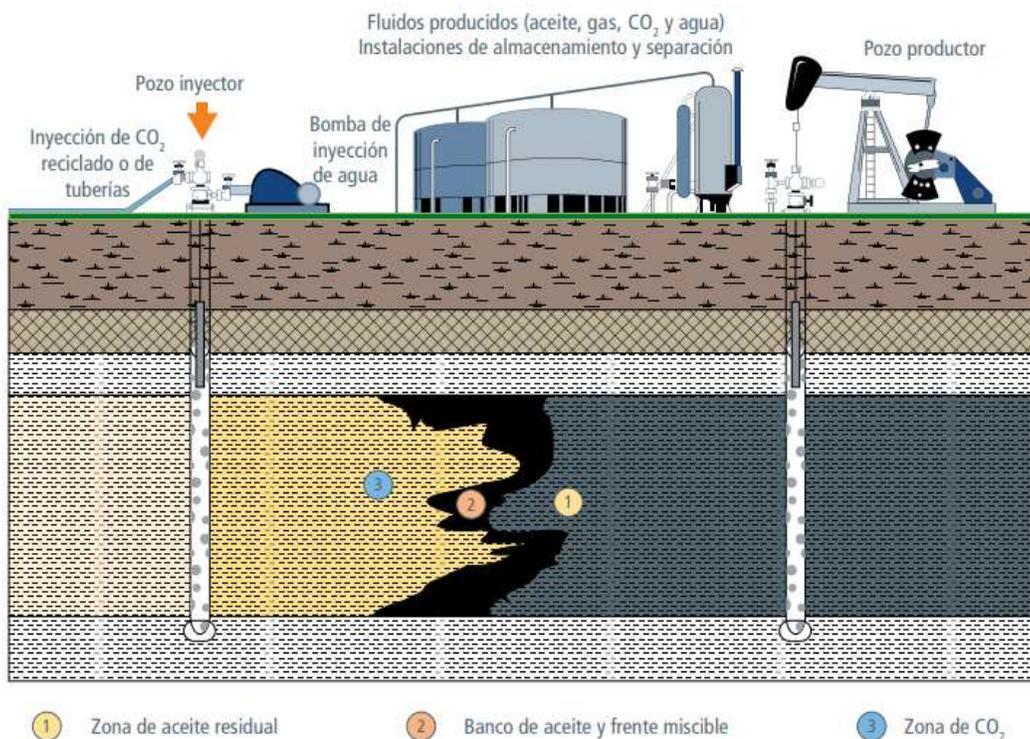
2.1.7.3. Metodos de inyeccion

Existen esencialmente dos métodos de inyección de CO₂. En un tipo, el CO₂ es inyectado en la periferia de un campo donde la producción ha ido decayendo largamente por medios de recobro primario y el petróleo y el CO₂ son barridos a lo largo de un frente hacia los pozos productores. En este proceso, el agua es usualmente inyectada alternativamente con el CO₂ (Gas Alternado con Agua o WAG), con ello se evita tener dos problemas comunes asociados con la inyección continua de dióxido de carbono: Una saliente viscosa del CO₂ a través del yacimiento y/o rebasamiento por gravedad del petróleo. Ambos factores reducen la

eficiencia de barrido del CO₂ a través de los canales de flujo del reservorio. El otro método de recobro es el proceso Huff and Puff (Inyección Alternada). Donde el CO₂ es inyectado dentro del pozo y es cerrado por dos o cuatro semanas. Más tarde, el CO₂ y el petróleo son producidos de vuelta por el mismo pozo. El ciclo de producción e inyección es generalmente repetido dos a tres veces. La cantidad de incremento del petróleo recuperable de cada sucesivo tratamiento generalmente declina del realizado previamente, hasta que este ya no es viable económicamente para inyectar más CO₂. El caso de estudio será sobre el campo Timbalier Bay, Louisiana donde dos proyectos Huff and Puff de CO₂ fueron conducidos en el Reservorio (BA) a 4900 pies identificada como una unidad de Arena. (Petroleo America, 2011)

En la figura 2 se representa como se lleva a cabo el proceso de inyección de CO₂ en los yacimientos de petróleo mediana mente pesados y extra pesados mediante una fuerza de desplazamiento que dirige una mezcla miscible sin tensión interfacial diciéndose al pozo productor para luego ser separado para en caso del CO₂ su reutilización y el crudo a ser refinado.

Figura 2. Sistema de inyección de CO₂ y agua



Fuente: <https://petroquimex.com/PDF/JulAgo18/EOR-Con-CO2.pdf>

ELABORADO POR:
Oficina de Investigaciones

REVISADO POR:
soporte al sistema integrado de gestión

APROBADO POR : Asesor de planeación
FECHA APROBACION:

2.1.8. Determinación de Presión mínima de miscibilidad (MMP)

En los métodos experimentales para determinar la MMP se utilizan muestras de crudo y gas de inyección para realizar pruebas a nivel laboratorio. En estas pruebas se trabaja a temperatura constante y similar a la temperatura del yacimiento en estudio. (Chávez Bonilla, 2012)

2.1.8.1. Función del Slim-tube por Core-Laboratories

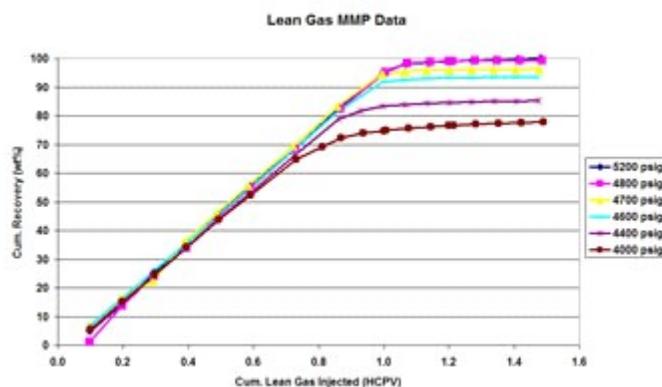
La presentación de la siguiente información que nos ofrece la compañía Core Laboratories con más de 80 años de experiencia en temas de liderazgo de innovación y tecnología para la industria petrolera con acciones de investigación y desarrollo, en el sitio web de Core Lab nos brinda como se debe realizar una prueba de laboratorio para determinar la presión mínima de miscibilidad con el Slim-Tube.

Tomado de: Sitio web Core Laboratories

Miscibilidad mínima: tubo delgado

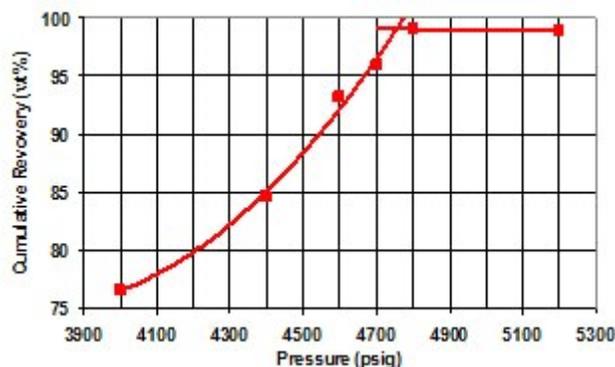
Se realiza una prueba de miscibilidad de tubo delgado utilizando la configuración del equipo como se muestra. Por lo general, la prueba se realiza dentro de una columna de 40 pies preempaquetada (cuentas de vidrio o arena de Ottawa) de ¼" de diámetro externo de tubería de acero inoxidable en espiral. Se pueden utilizar columnas con diferentes longitudes y materiales de empaque a pedido. La porosidad y permeabilidad de la columna se mide al comienzo de cada conjunto de análisis. La columna se limpia, se evacua y se pesa antes de comenzar el procedimiento de prueba.

Se puede agregar una celda de PVT con ventana y una cámara a la configuración para observar visualmente el momento en que ocurre la penetración de gas. También se puede agregar un densitómetro de alta presión para medir la densidad del fluido efluente.



Las columnas / líneas se cargan previamente con tolueno y el sistema se calienta a la temperatura de prueba solicitada.

El líquido del depósito se inyecta en la columna y el tolueno se desplaza fuera del otro extremo controlando la presión final de la columna, utilizando un regulador de contrapresión (BPR). Después de que se haya inyectado un volumen de líquido de 1.5 poros, se conectan los aparatos de recolección de gas y líquido antes de desplazar más líquido. Se desplazan otros 10 ml de fluido para recoger el fluido para la medición de la densidad del líquido y el cálculo de GOR. Los datos se comparan con los datos originales de flash atmosférico en la muestra de fluido del yacimiento. Cuando los datos concuerdan con las mediciones originales, la prueba puede comenzar.



El gas de prueba se inyecta a una velocidad inicial de 6 ml por hora y los productos evolucionados se recogen continuamente. El volumen de gas evolucionado, el peso y la densidad residual del líquido se miden cada hora. La composición de los productos evolucionados se puede medir si el cliente lo solicita. La tasa de inyección de gas continúa a 6 ml por hora, durante 6 horas y luego se aumenta a 8 ml por hora durante el resto de la prueba. El punto exacto de penetración del gas se observará claramente por un aumento significativo en el GOR, una disminución en la densidad residual del líquido y un cambio en la composición del gas / gravedad del gas.

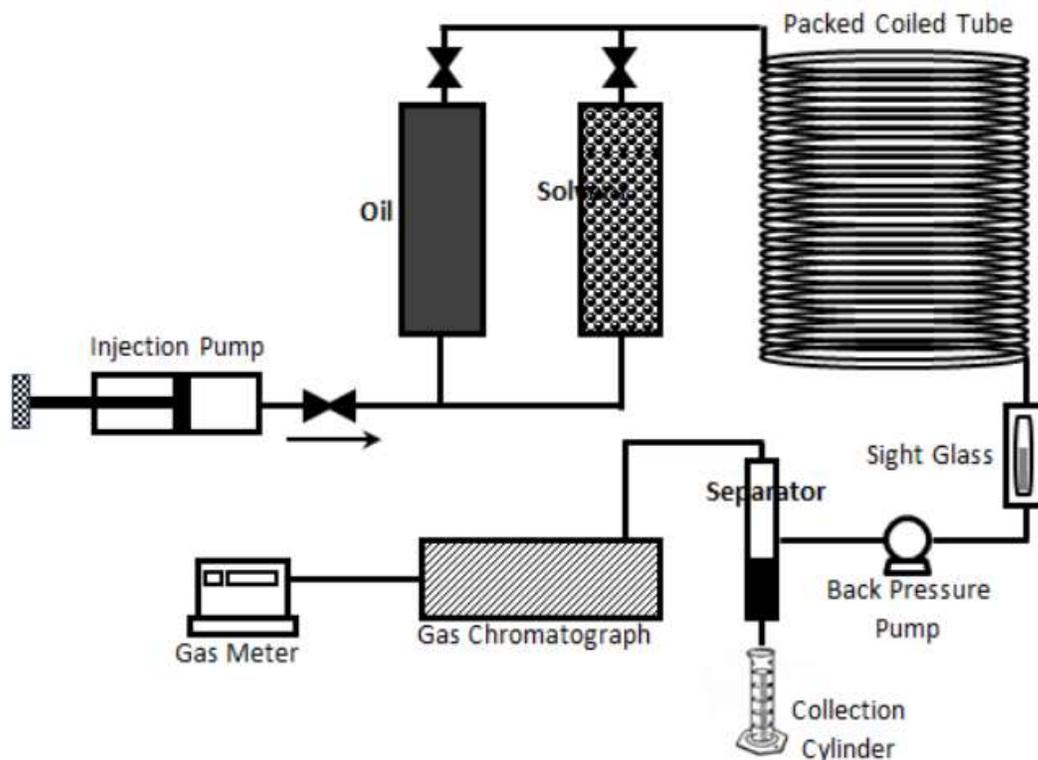
La prueba continúa hasta que se haya inyectado un volumen de 1,4 poros de gas de prueba en la bobina. El gas restante dentro de la bobina se "descarga" y se registra el volumen atmosférico. Cualquier aceite residual producido durante este proceso también se recoge y se pesa. La bobina se desconecta y se pesa para determinar el peso del aceite residual que queda al final de la prueba.

La prueba se realiza normalmente a entre 4 y 6 presiones de prueba. Una gráfica del volumen de aceite recuperado a 1.0 o 1.2 volúmenes de poros versus presión de prueba indicará la presión mínima de miscibilidad del fluido del depósito, para la composición de gas de inyección seleccionada.

Fuente: <https://www.corelab.com/ps/minimum-miscibility-slim-tube>

En la figura 3 se aprecia el esquema del Slim-Tube y sus principales componentes realizando una vista preliminar del trabajo que se ingenia realizar y en la Figura 4 es un Slim-Tube propuesto por Vinci Technologies: Laboratory and fiels instruments for Petroleum Industry dando una idea del dimensionamiento total del equipo y especificaciones de cada una de sus características a tener en cuenta para la adecuación, estas se encuentran en la Tabla 1.

Figura 3. Esquema del Experimento Slim-Tube o Tubo delgado



Fuente: <http://perminc.com/resources/fundamentals-of-fluid-flow-in-porous-media/chapter-5-miscible-displacement/determination-miscibility-condition/slim-tube-test/>

Figura 4. Slim Tube System (STS 700) por Vinci Technologies Lab



Fuente: <https://www.vinci-technologies.com/products-explo.aspx?IDR=113223&idr2=113241&IDM=753847>

Tabla 1. Especificaciones Slim Tube System (STS 700)

DESCRIPCIÓN	STS700
Longitud del tubo	24 m (80 pies)
Diámetro externo del tubo	1/4 "
Material	acero inoxidable
Medios porosos	Calibrado 230 - 310 μ m de sílice
Porosidad aproximada	35%
Volumen de poro aproximado	100 cc
Presión de trabajo	700 bar (10,000 psi)
Temperatura de trabajo	hasta 150 ° C
Fluidos	aceite vivo, gas HC, CO ₂ , solvente
Fuente de alimentación	220 VAC 50 Hz

Fuente: <https://www.vinci-technologies.com/products-explo.aspx?IDR=113223&idr2=113241&IDM=753847>

Estas pruebas son costosas ya que, además de las muestras de fluidos y personal técnico especializado, demanda equipos especializados que trabajen a alta presión y consumen una apreciable cantidad de tiempo para la obtención de datos. (Chávez Bonilla, 2012)

2.1.9. Componentes del Equipo Slim-Tube

Como se ha podido observar en la Figura los componentes necesarios y de más importancia para realizar un estudio experimental de desplazamientos miscibles y determinar la presión mínima de miscibilidad son los siguientes:

- Módulo de tubo delgado “Packed Coiled Tube”
- 2 acumuladores de pisto flotante para la inyección de crudo y gas
- Bombas de presión para inyección continua “Injection Pump”
- Regulador de contrapresión “Back pressure pump”
- Horno de calentamiento
- Válvulas hidráulicas
- Separador
- Cromatógrafo “Gas Chromatograph”
- Sensores de medición
- Tubo de vidrio capilar “Sight Glass”

Siendo esta una lista preliminar de lo que se debe poseer antes de realizar la instalación y puesta a punto del equipo se da una breve explicación de los elementos mencionados que son más desconocidos desde el punto de vista de los conocimientos aportados por la formación universitaria y así obtener una clara explicación de su funcionalidad y como nos aporta en el proceso de los análisis de desplazamiento miscible.

2.1.9.1. Tubo de vidrio capilar “Sight Glass”

En la Figura 5 se muestra un tubo de vidrio capilar producido por Vinci Technologies que proporciona un medio para confirmar visualmente la miscibilidad de los fluidos desplazados durante los procesos dinámicos, como los experimentos de miscibilidad de tubo delgado “Slim-Tube” y la prueba de desplazamiento del núcleo. La celda está hecha con un tubo capilar de vidrio abrazado con dos bridas en sus extremos. (Vindum Engineering, s.f.)

Figura 5. Tubo Capilar de vidrio por Vinci Technologies Lab



Fuente: <https://vindum.com/products/special-core-analysis/components/capillary-sight-glass-tube>

2.1.9.2. Cámara de separación de gas/líquido “Separator”

Se presenta el separador por el fabricante Vinci Technologies de modelo GLSC teniendo como objetivo permitir separar las fases gaseosa y líquida de un efluente que sale del BPR. La fase gaseosa escapa de un puerto de salida superior mientras que la fase líquida se dirige a un puerto de salida inferior. La cámara utiliza un pistón interno que abre un puerto de salida de gas en caso de gas o abre un puerto de salida de líquido en caso de líquido. Este dispositivo es particularmente útil cuando el fluido a muestrear contiene una fase gaseosa. Después de separarse, el gas puede medirse con un medidor de gas y el líquido puede recogerse usando un colector de fracciones. (Vindum Engineering, s.f.)

Figura 6. Separador por Vinci Technologies Lab



Fuente: <https://vindum.com/products/special-core-analysis/components/gas-liquid-separation-chamber>

2.1.9.3. Regulador de contrapresión BPR

Vinci ofrece reguladores de contrapresión diseñados para regular la presión en los estudios de flujo de fluidos. El BPR consta de dos cámaras separadas por un pistón con una aguja conectada en el lado inferior. La cámara superior recibe la presión del domo de gas y la cámara inferior la presión del proceso. El BPR actúa como un comparador. Cuando la presión del domo es más alta que la presión del proceso, la aguja sella la presión y mantiene la presión. Inversamente, cuando la presión del proceso excede la presión del domo, la aguja se abre y el exceso de fluido del proceso fluye. De esta manera, en flujo continuo, estas 2 etapas se enlazan continuamente y la presión del proceso se equilibra al valor constante controlado por el domo. (Vindum Engineering, s.f.)

Figura 7. Tubo Capilar de vidrio por Vinci Technologies Lab

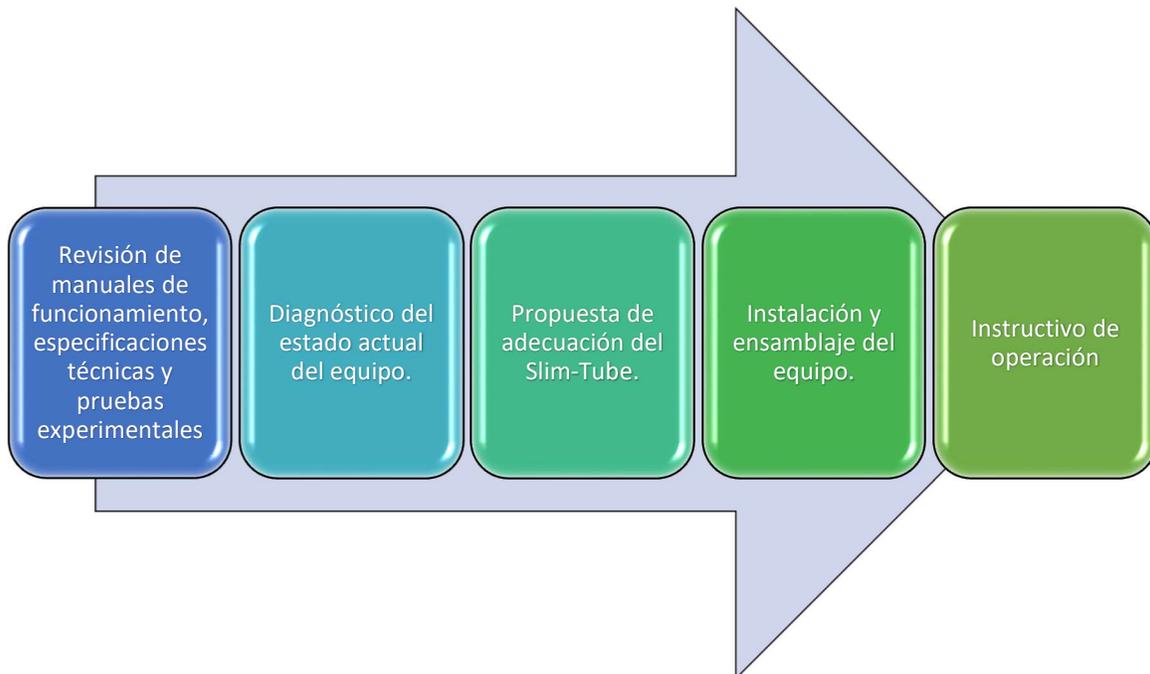


Fuente: <https://vindum.com/products/special-core-analysis/components/back-pressure-regulator>

3 DESARROLLO DEL TRABAJO DE GRADO.

Las fases estipuladas para el proyecto de adecuación del equipo Slim-Tube se muestran en el diagrama de flujo (Véase Figura 1). Se inicia con una inspección bibliográfica de: manuales de operación, funcionamiento, antecedentes y especificaciones técnicas del equipo. En la segunda fase, se diagnosticó el estado en que se encuentra cada componente evaluando la funcionalidad y al mismo tiempo listando las partes faltantes para planear su respectiva adquisición. En la tercera fase se establece el diseño planteado. En la cuarta fase se ejecuta el armado del Equipo Slim-Tube ensamblando sus partes faltantes y por último la elabora un instructivo describiendo los procedimientos para los montajes de ensayos involucrando los riesgos asociados a estos como quinta fase del proyecto.

Figura 8. Fases del proyecto



Fuente: Autor

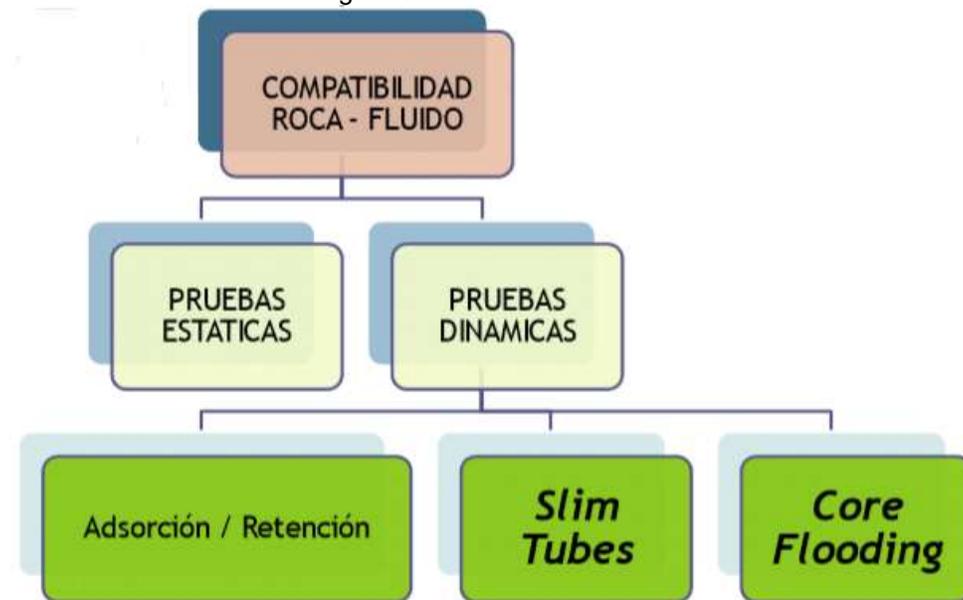
3.1. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

Durante las primeras semanas se realiza la revisión bibliográfica del equipo, se revisan los instructivos de operación y mantenimiento facilitados en el laboratorio, para conocer el funcionamiento de los componentes del sistema, siendo una fase relevante en el trabajo para lograr mejores resultados en el diagnóstico y la rehabilitación del equipo.

3.1.1. Información y antecedentes del Equipo

Los experimentos con el Slim Tube hacen parte del grupo de pruebas dinámicas junto con aquellos realizados con el Coreflooding. Su objetivo principal es estudiar las propiedades de las rocas y sus interacciones con los fluidos también llamados análisis Roca-Fluido. En la Figura 2 muestra un diagrama de clasificación por tipos de pruebas.

Figura 9. Análisis Roca-Fluido



Fuente: (Castro Garcia, 2011)

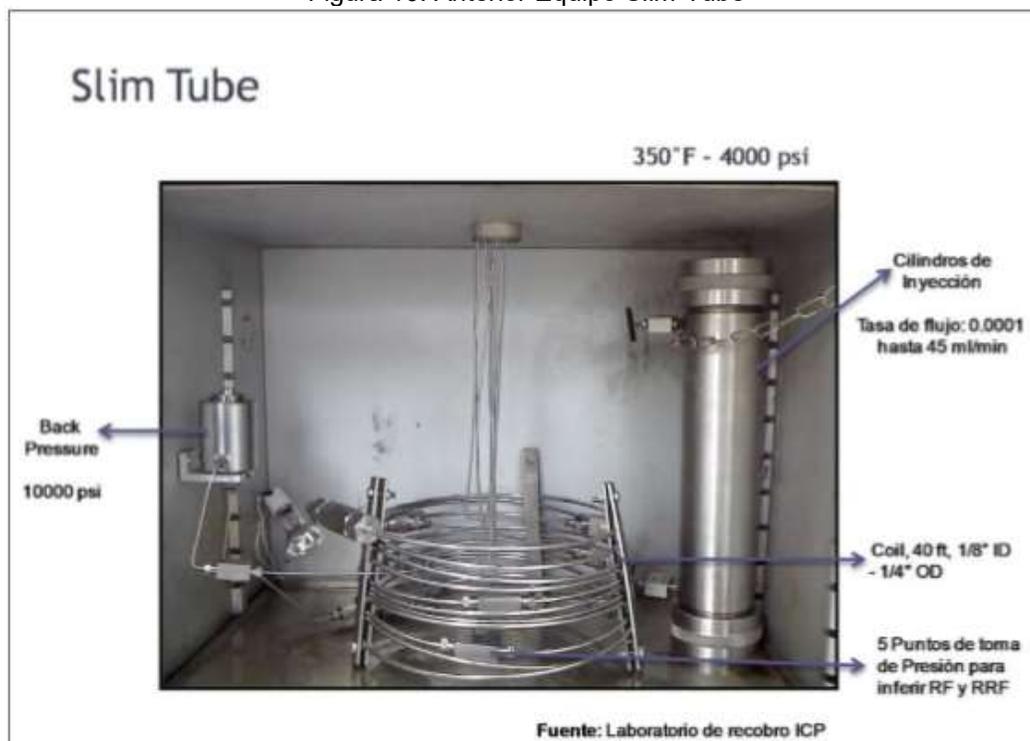
Estos dos ensayos se complementan ya que manejan el mismo principio de funcionamiento. En ambos se muestra el comportamiento del desplazamiento de

los fluidos inyectados a condiciones de yacimiento. Su diferencia radica en la longitud analizada, para el Coreflooding es un pie y para el Slim Tube pueden llegar hasta 60 pies. Las pruebas se realizan con el objetivo de evaluar el mecanismo de desplazamiento, determinar factor de resistencia (RF), factor de resistencia residual (RRF) y cálculo de permeabilidad de forma experimental son parámetros que se analizan en el Laboratorio de Recobro Mejorada (Castro Garcia, 2011).

Además de las pruebas mencionadas, el Slim Tube puede realizar análisis de presión mínima de miscibilidad utilizando dióxido de carbono CO₂ analizando el comportamiento de la movilidad en el yacimiento con la finalidad de aumentar la producción.

En la Figura 3 su muestra una imagen del equipo Slim tube y la Ficha técnica en la Tabla 1.

Figura 10. Anterior Equipo Slim-Tube



Fuente: (Castro Garcia, 2011)

Tabla 2. Ficha Técnica anterior Slim Tube

FICHA TÉCNICA	
Longitud	40 pies
Diámetro	1/4" OD
Presión de trabajo	4000 psi
Puntos de toma de presión	5 pies 10 pies 20 pies 30 pies 40 pies
Contrapresión	Presión de trabajo hasta 10000 psi Fluido de trabajo Nitrógeno gaseoso
Bomba de desplazamiento	Tasa de flujo 0.0001 hasta 45 ml/min con flujo continuo Presión de trabajo hasta 10000 psi
Horno	Temperatura de trabajo hasta 350 °F

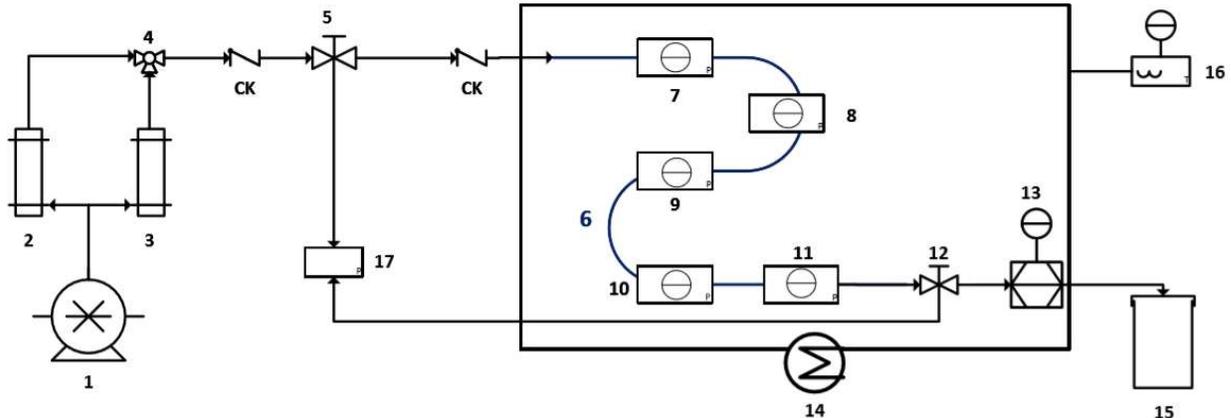
Es importante resaltar que este equipo se utilizó en estudios de investigación para evaluar los procesos de inyección de CDG en el Campo Dina Cretáceo (DK), siendo el primer proyecto piloto en Colombia que ha incrementado el factor de recobro terciario.

3.1.2. Descripción general

El equipo consta de un Slim Tube (Tubo delgado) de 30 pies de longitud, este debe ir completamente empaquetado con arena representativa del yacimiento a analizar. También cuenta con puntos de toma de presión diferencial distribuidos a lo largo del tubing, cilindros de almacenamiento de las sustancias que se van a inyectar y un sistema de contrapresión (Back pressure), todo esto dentro de un Horno industrial que facilita el cambio de temperatura simulando a la que se encuentra en el yacimiento.

También como componentes necesarios externos para la operación del equipo se encuentran: la bomba de desplazamiento positivo encargada de la inyección, un recipiente recolector (Beaker) para almacenar el efluente y un juego de tubing-accesorios con una adaptación bypass para toma de muestras de fluido y accesos a puntos de presión.

Figura 11. Esquema general del Equipo Slim-Tube



En la Figura 4 se puede apreciar el conjunto de partes en un diagrama P&ID explicado a continuación según los numerales:

- 1 Bomba de desplazamiento positivo (ISCO, QUIZIX, JEFRI).
- 2 y 3 Cilindros de almacenamiento de sustancias a inyectar (Salmuera sintética, Agua destilada, KCL, Polímeros, CDG, Crudo, etc.).
- 4 Válvulas de mezclado.
- 5 y 12 Válvulas reguladoras.
- 6 Slim Tube de 30 pies de longitud, diámetro de ½ in en Acero Inoxidable 316 con un espesor de 1/16 in.
- 7, 8, 9, 10 y 11 Tomas de presión diferencial (Transductores Smart).
- 13 Back pressure.
- 14 Horno industrial.
- 15 Vaso de precipitado.
- 16 Control de Temperatura (Integrado en el Horno).
- CK Válvulas de Cheque cuya funcionalidad es restringir el flujo en una única dirección.

3.1.3. Funcionamiento

Con este equipo se pueden realizar dos grandes estudios: analizar la movilidad (K, RF y RRF) o determinar la presión mínima de miscibilidad (MMP). Según sea el objetivo del ensayo, se definen los equipos o piezas necesarios a utilizar.

PRUEBAS CON TECNOLOGIA CON GELES DE DISPERSIÓN COLOIDAL CDG

Primeramente, se debe iniciar con las actividades de empaquetado de la tubería del Slim Tube ya sea de forma manual o con herramienta compactadora que se describen en el Anexo A. El procedimiento de la prueba experimental se describe en la figura 5.

Figura 12. Proceso del ensayo experimental con CDG



Fuente: (Castro Garcia, 2011)

El funcionamiento del equipo inicia en los cilindros de muestras (capacidades normalmente de 500 ml), los cuales son llenados con los fluidos de prueba (KCL, polímeros, CDG, Crudo) para posteriormente ser accionados mediante la bomba de desplazamiento positivo a un flujo prestablecido por el usuario. La bomba utiliza un fluido de empuje generalmente salmuera o agua destilada que hace presión al cilindro y desplaza el fluido de prueba a lo largo del Slim Tube empaquetado en el interior del Horno, garantizando que el proceso se lleva a cabo a temperatura de yacimiento. El fluido de prueba viaja por el medio poroso o vacío que se encuentran entre los granos de la arena al interior del tubing, en la transición de la inyección del fluido se genera una presión debido a la obstrucción ejercida por medio poroso, la presión comenzará a incrementar hasta un punto de estabilización. Esta presión diferencial es registrada por los sensores y enviada a un punto de recolección de datos salvando un histórico y como primer paso poder obtener una curva de permeabilidad (K) calculada del medio poroso por medio de la siguiente ecuación:

$$K = \frac{245.6 * Q * \mu * L}{A * \Delta P}$$

Donde:

K = Permeabilidad

Q = Caudal o Tasa de flujo

μ = Viscosidad

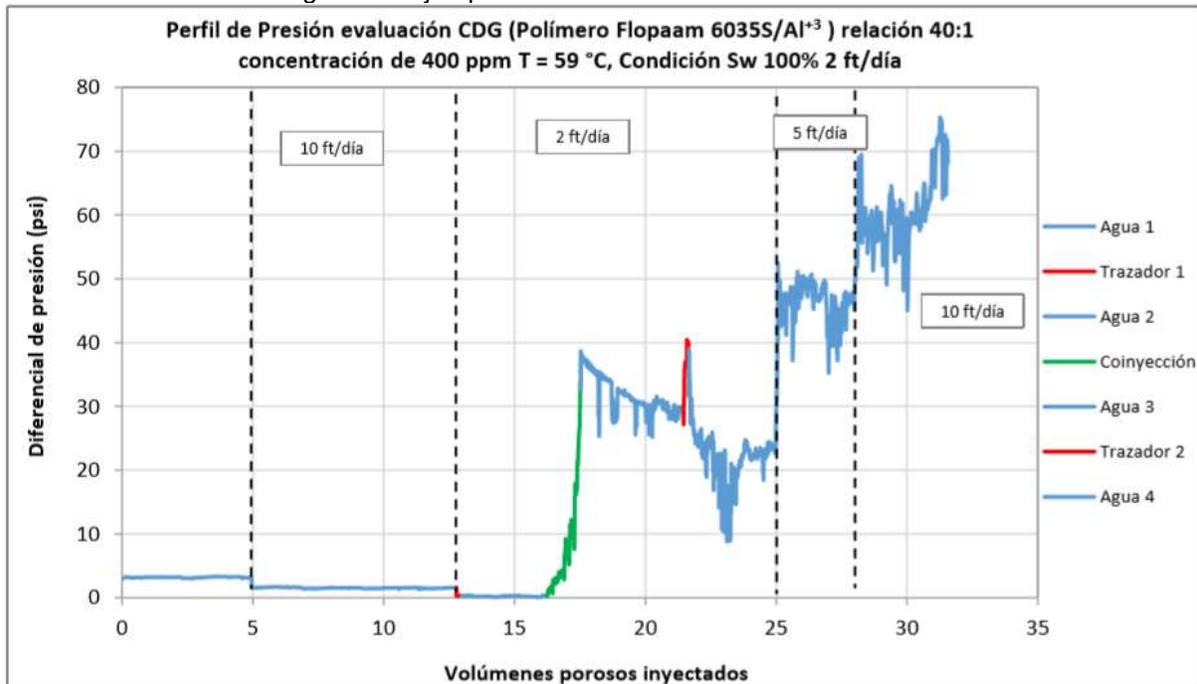
L = Longitud

A = Area

ΔP = Diferencial de Presion

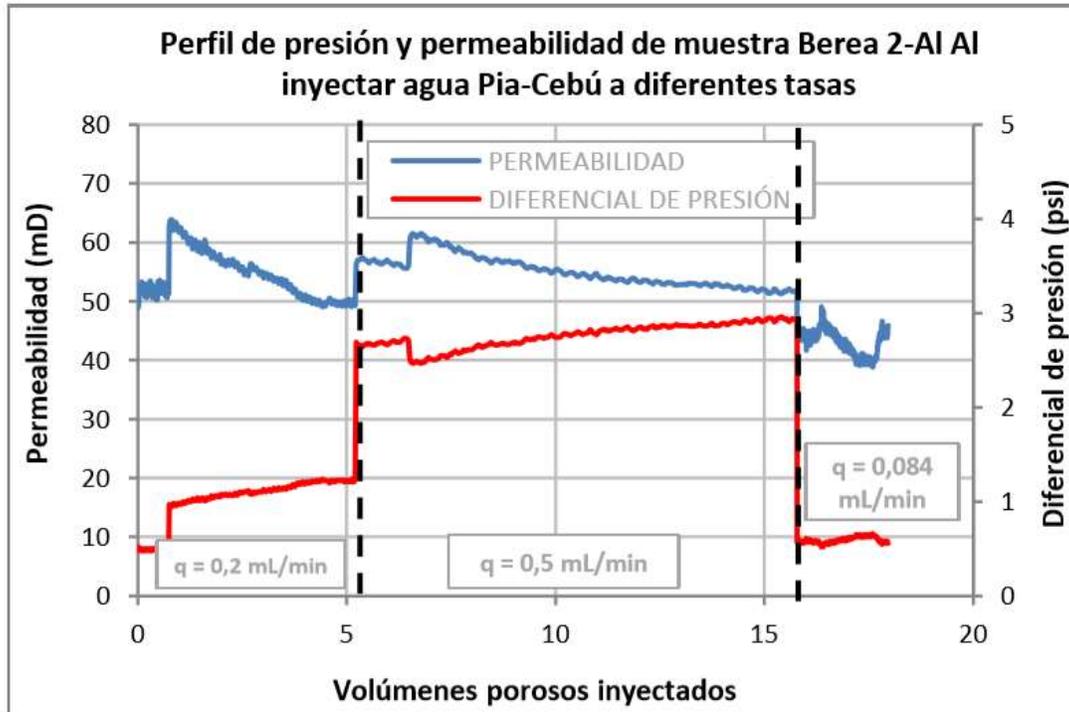
Con la ecuación anterior se debe garantizar que los datos suministrados deben ser fijos o constantes para dar un valor de permeabilidad, como es común la presión tiene un comportamiento dinámico, es decir, que cambia su valor en el tiempo, y está relacionada directamente con la tasa de flujo definida. De acuerdo a lo anterior y según el protocolo se determina un caudal de inyección y la presión irá en incremento hasta estabilizarse. Luego, se cambia la tasa y por consiguiente la presión. Entendiendo lo anterior los ejemplos que se presentan en la Figura 6 y 7 son los resultados que se desea obtener del equipo.

Figura 13. Ejemplo Grafica de Diferencia de Presión



Fuente: (Maya Toro, 2018)

Figura 14. Ejemplo Grafica de Permeabilidad

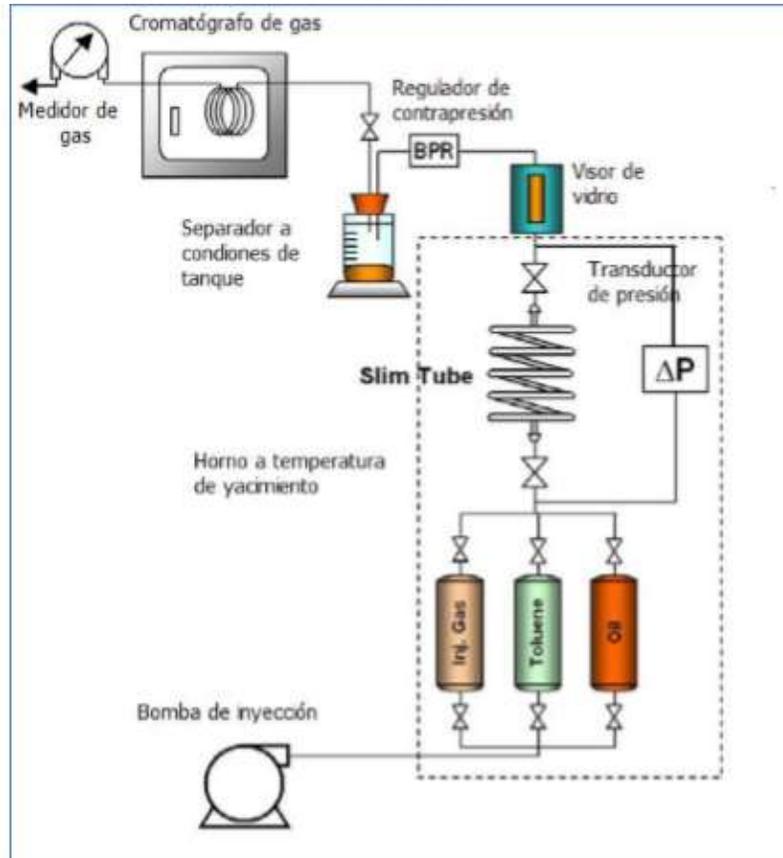


Fuente: (Maya Toro, 2018)

- **PRUEBAS PARA DETERMINAR MMP**

En esta técnica el equipo consta principalmente de un tubo delgado enrollado en forma de espiral con una longitud que varía entre 7 y 23 m de longitud y con un diámetro capilar que se encuentra alrededor de 6.3 mm; este tubo está empacado con esferas de vidrio o con arena de 0.074 a 0.147 mm de diámetro. El diagrama del equipo se muestra en la Figura 8, el equipo está constituido por tres celdas de volumen variable (cilindros free pistón) para almacenar fluidos, una bomba de desplazamiento positivo, un transductor de presión, un regulador de contrapresión BPR (Back Pressure Regulator) y una celda donde se puede observar los cambios de color indicativos de la formación del frente miscible. Todo el equipo se coloca dentro de un baño con regulación de temperatura. (Chavez Bonilla, 2012) Este equipo puede variar desde un simple cilindro graduado y un medidor de mojado hasta un sistema más complicado que involucre un cromatógrafo de gas. Una pequeña celda visual se incluye también en final del efluente así que el fluido producido puede ser observado. (Velandia Suescún, 2010)

Figura 15. Esquema del equipo Slim-Tube para mediciones experimentales de la presión de miscibilidad

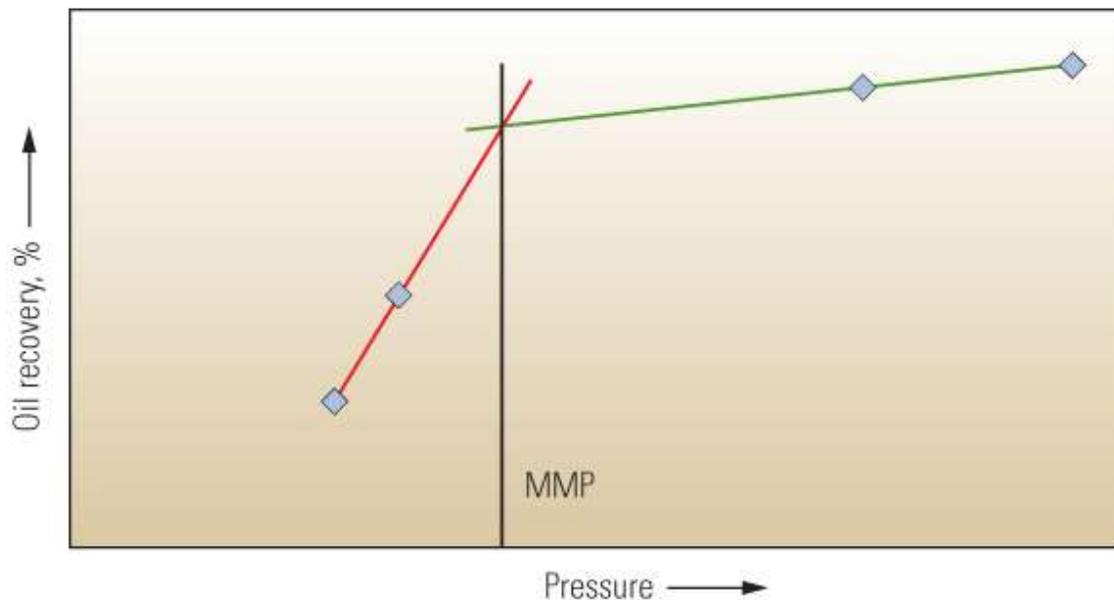


Fuente: (Velandia Suescún, 2010)

Para llevar a cabo una prueba, el medio poroso en el tubo es llenado con el hidrocarburo que va a ser desplazado. Esto se llena normalmente con una muestra del aceite del yacimiento que está siendo considerado para el desplazamiento miscible. El sistema se lleva a la temperatura de prueba, y el regulador de contrapresión se programa a la presión deseada para el desplazamiento. El fluido desplazante es inyectado entonces a una tasa constante. Una tasa lineal de avance considerablemente mayor que la que se usará en el yacimiento es la que se usa con el fin de completar el experimento en una cantidad de tiempo razonable. La caída de presión en el sistema es por lo general una pequeña fracción del nivel promedio de la presión absoluta en el tubo. Del experimento se obtienen la recuperación de hidrocarburos al momento de irrupción de los fluidos inyectados, la recuperación al momento de la inyección de un número específico de volúmenes porosos y/o el recobro final de hidrocarburos. (Velandia Suescún, 2010)

Este gas inicialmente se inyecta a una velocidad muy lenta de 1.2–2.5m/hr para incrementarse gradualmente después de que 0.6 volúmenes de poro de gas hayan sido inyectados, el desplazamiento miscible termina cuando se hayan inyectado 1.2 volúmenes de poro de gas. Para estimar la MMP mediante la técnica de tubo delgado es necesario realizar mínimo 5 pruebas de desplazamiento a distintas presiones y a temperatura constante utilizando el mismo gas de inyección durante estas pruebas para obtener una gráfica como se muestra en la Figura 9. El criterio para elegir la MMP es mediante el cambio de pendiente de los puntos experimentales graficados, cuando cambia de pendiente la tendencia de dichos puntos se dice que la recuperación del crudo comienza a ser constante y que es donde se obtiene la MMP. A medida que aumenta la presión se incrementa la recuperación hasta llegar a un punto en donde se mantiene constante. La presión donde comienza a ser constante la recuperación es la MMP. (Chavez Bonilla, 2012)

Figura 16. Grafica Presión vs Porcentaje de recobro



Fuente: (Schlumberger, 2019)

Las desventajas de este método experimental para determinar la MMP son:

Para obtener cada punto se necesita un tiempo aproximado de una semana, por lo tanto para estimar la MMP por esta técnica es necesario contar con 5 semanas de arduo trabajo. Consumen bastante tiempo experimental para llevar a cabo un dato de presión de desplazamiento entre la ejecución de la prueba, limpieza del equipo e inicio de la siguiente, por lo tanto, es costosa esta prueba. (Chavez Bonilla, 2012)

3.1.4. Equipos periféricos asociados al Slim-Tube para su adecuado funcionamiento y operación.

- BOMBA DE DESPLAZAMIENTO POSITIVO:** Los sistemas de flujo continuo Teledyne ISCO Serie D acoplan dos módulos de bombeo a un solo controlador y utilizan un colector de válvula activo o pasivo para proporcionar una alimentación continua sin interrupciones de casi cualquier fluido. El controlador recarga una bomba mientras la otra entrega, usando algoritmos especiales para igualar la presión y el flujo de ambas bombas. Esto permite una transición prácticamente sin impulsos en el cambio de bomba mientras se mantiene un caudal preciso. (VERTEX Technics, s.f.)

Tabla 3. Ficha Técnica Bomba desplazamiento Positivo ISCO

FICHA TÉCNICA	
Máxima presión de trabajo	10,000 PSI (68.9 MPa)
Capacidad por Pistón	103 cm ³
Máxima tasa de flujo	60 cm ³ /min único pistón 45 cm ³ /min Dual
Mínima tasa de flujo	0.00001 cm ³ /min
Resolución de volumen	9.6 ml
Máxima temperatura de operación	5 a 40 °C

Fuente: (Colmenares Vargas, 2019)

- CILINDROS:** Presión de 5000 psi, volúmenes de 1000 ml, 500ml o 600ml según la disponibilidad del laboratorio, este cilindro de pistón libre se inyecta por un extremo el fluido desplazante y en el otro extremo se almacena el fluido a inyectar en las pruebas, a medida que se suministra un volumen desde la bomba de desplazamiento positivo genera una presión al interior y nos brinda una salida de volumen igual a la entrada, de esta manera se suministra con seguridad a una tasa precisa.
- HORNO DiEs:** Se analiza la geometría del horno disponible y predispuesto en el laboratorio para el montaje del Equipo Slim Tube, tratando de aprovechar al máximo el espacio al interior del mismo y poder darle una ubicación en este caso al Slim-Tube y a los Cilindros.

Sus principales aplicaciones se encuentran en laboratorios que requieran mantener temperaturas constantes y precisas por encima del ambiente, en procesos tales como secado, curado, etc (Comtitronic) .A continuación se incluye la ficha técnica del Horno DiEs.

Tabla 4. Ficha Técnica Horno DiEs TH720

FICHA TÉCNICA	
Modelo	TH720
Capacidad	720 Litros
Materiales interiores	Acero inoxidable tipo 304
Materiales exteriores	Lamina con acabado en pintura epoxica de aplicación electrostática
Dimensiones interiores	Ancho 1000mm Alto 1200mm Profundidad 640mm
Dimensiones exteriores	Ancho 1340mm Alto 1800mm Profundidad 960mm
Sensor de Temperatura	4 - PT100

Voltaje	220 VAC / 60 Hz
Rango de Temperatura	10°C - 200°C
Control	PID

Fuente: (Comtitronic)

Además, se debe tener en cuenta los orificios por donde la tubería va a salir del horno hacia la toma de muestra. Son siete (7) orificios en su totalidad con un diámetro de ½ pulgada.

- **TRANSMISOR DE PD SMART LD301:** El LD301 es un transmisor de presión inteligente para la medición diferencial, manométrica y absoluta de diámetro, nivel y flujo. El transmisor se basa en un sensor capacitivo probado en el campo, que ofrece un funcionamiento seguro y de alto rendimiento. La tecnología digital que se usa en el LD301 permite seleccionar varios tipos de funciones de transferencia, una fácil interfaz entre el campo y la sala de control, y algunas características que reducen notablemente los costos de instalación, operación y mantenimiento. (Smar, 2010)

Tabla 5. Ficha técnica Sensor de Presión LD301

FICHA TÉCNICA	
Referencia	BR-14160
Rangos de Presión	0 - 360 psi Modelo H4 0 - 3600 psi Modelo H5
Salida del transmisor	4mA – 20mA
Voltaje	24 VDC 30 VDC máx.
Temperatura Ambiente	60°C máx.
Fabricado	Brasil

Fuente: (Smar, 2010)

- **OPTO 22:** Es un controlador famoso y es una herramienta clave y apoyo para el analista en la captura de información, sabiendo que las evidencias son algunos de los soportes para realizar una investigación, Opto 22 facilita la conexión, control, monitoreo y la recopilación de los datos necesarios para operar un equipo de forma automatizada. Este controlador tiene una reputación de facilidad de uso, innovación, calidad y confiabilidad en los Laboratorios del ICP; por esta razón se decide optar por la mejor opción y este software cumple con las necesidades, siendo una fuente de documentación de variables comunicada desde los sensores para las pruebas de permeabilidad en el Equipo Slim Tube, permitiendo ver el comportamiento de estas durante los procesos de pruebas experimentales.

3.2. DIAGNÓSTICO DEL ESTADO ACTUAL DEL EQUIPO

En esta segunda fase del proyecto según la revisión bibliográfica se busca determinar los implementos físicos para llevarse a cabo el montaje del Equipo, con esta consecución de partes se evalúa la disponibilidad y condiciones de estas dentro del laboratorio.

3.2.1. Diagnóstico

Dentro de las actividades del diagnóstico, se realiza el inventario de los insumos necesarios para construcción. Posteriormente se emite un concepto sobre la condición funcional de cada uno de ellos (ver tabla 5).

Tabla 6. Inventario Slim Tube InHouse

INVENTARIO MONTAJE SLIM TUBE INHOUSE			
Cantidad	Descripción	Registro Fotográfico	Observaciones
12	Tubing en SS316 (L=2,3 pies) (1/2")		ÓPTIMO
10	Tubing en SS316 (L=0,2 pies) (1/2")		ÓPTIMO
10	Tubing en SS316 (L=0,4 pies) (1/2")		ÓPTIMO

24	Codo 1/2"		ÓPTIMO
8	Tees 1/2"		ÓPTIMO
9	Tees 1/4"		ÓPTIMO
2	Cruces 1/2"		ÓPTIMO
2	Cruces 1/4"		ÓPTIMO
12	Válvulas de bola de 1/2"		ÓPTIMO
1	Válvula cheque		ÓPTIMO
66	Tuercas para armar tubing		ÓPTIMO

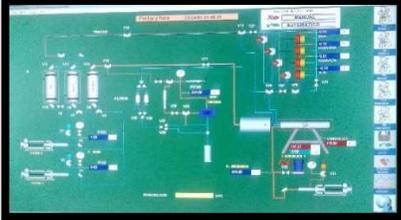
3	SMAR H4 (0-360 psia)		ÓPTIMO
3	SMAR H5 (0-3600 psia)		1 FALTANTE
1	BPR (Back Pressure Regulator)		SEGÚN DISPONIBILIDAD DEL LABORATORIO
4	Reducción de 1/2" NPT a 1/4"		ÓPTIMO
12	Reducción 1/4 NPT a 1/4 FLARE		ÓPTIMO

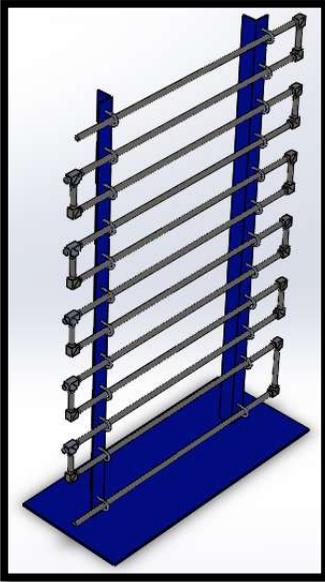
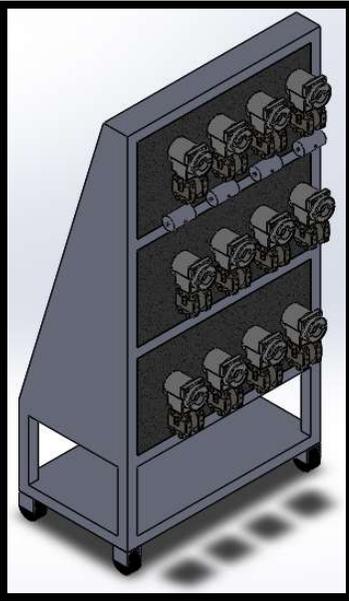
<p>1 m2</p>	<p>Malla inoxidable mesh 325</p>		<p>ÓPTIMO</p>
<p>1</p>	<p>Horno DiEs</p>		<p>FUNCIONAL, PENDIENTE MANTENIMIENTO Y ADECUACIÓN</p>
<p>1</p>	<p>Bomba desplazamiento positivo</p>		<p>SEGÚN DISPONIBILIDAD DEL LABORATORIO</p>

ELABORADO POR:
Oficina de Investigaciones

REVISADO POR:
soporte al sistema integrado de gestión

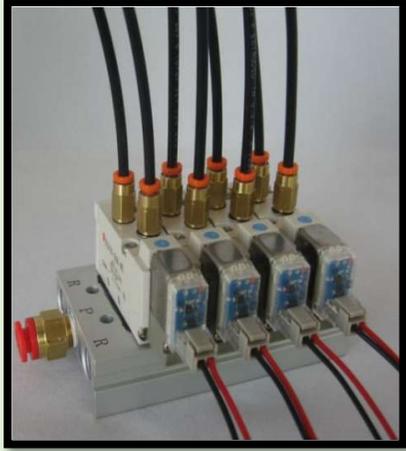
APROBADO POR : Asesor de planeación
FECHA APROBACION:

<p>3</p>	<p>Cilindros de almacenamiento</p>		<p>SEGÚN DISPONIBILIDAD DEL LABORATORIO</p>
<p>1</p>	<p>Software OPTO 22</p>		<p>EN PROCESO DE COMPRA</p>
<p>1</p>	<p>Ordenador</p>		<p>NO TIENE SU PROPIO EQUIPO PARA ESTA PRUEBA</p>

<p>1</p>	<p>Soporte Slim Tube</p>		<p>ÓPTIMO</p>
<p>1</p>	<p>Bancos transmisores de presión</p>		<p>PENDIENTE ADQUISICIÓN</p>

El inventario anterior está relacionado únicamente al montaje del equipo Slim Tube InHouse propósito principal del proyecto, sin embargo, se nombrarán a continuación en la Tabla 6 los suministros complementarios para la construcción del equipo Slim Tube definitivo (diferencias descritas en la sección 3.3.2 del presente documento).

Tabla 7. Suministros complementarios Slim Tube definitivo

INVENTARIO MONTAJE SLIM TUBE			
Cantidad	Descripción	Registro Fotográfico	Observaciones
12	Electroválvulas		EN PROCESO DE COMPRA
3	Manifold		EN PROCESO DE COMPRA
3	SMAR H4 (0-360 psia)		EN PROCESO DE COMPRA
3	SMAR H5 (0-3600 psia)		EN PROCESO DE COMPRA

En vista a lo explicado en la sección 3.1.3 referente al funcionamiento y de acuerdo al tipo de estudio que se desea realizar, se entiende que el listado de suministros mostrados en las tablas 5 y 6 tiene como objetivo el montaje del equipo Slim Tube

ELABORADO POR:
Oficina de Investigaciones

REVISADO POR:
soporte al sistema integrado de gestión

APROBADO POR : Asesor de planeación
FECHA APROBACION:

especialmente para pruebas experimentales de movilidad con tecnología CDG (presente en estudios alrededor de los últimos 10 años) o polímeros, análisis con un alto grado de parentesco a los realizados en el Coreflooding.

Una vez el equipo Slim Tube esté en su fase definitiva se puede añadir más componentes para guiar realización de ensayos experimentales de presión mínima de miscibilidad. Por consiguiente, es relevante conocer los equipos adicionales para este tipo de pruebas (ver tabla 7) aunque esta etapa queda pendiente a análisis de viabilidad según sea la prioridad de las pruebas que se estén requiriendo en el laboratorio.

Tabla 8. Suministros adicionales para pruebas de MMP

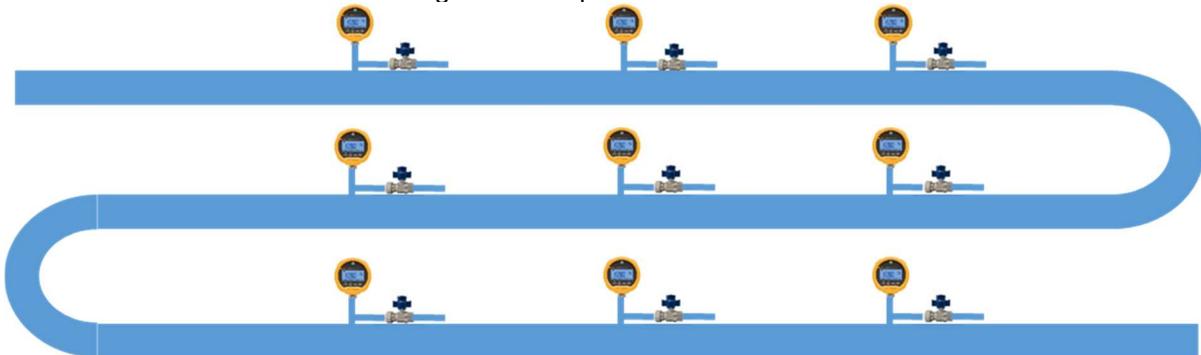
INVENTARIO MONTAJE SLIM TUBE			
Cantidad	Descripción	Registro Fotográfico	Observaciones
1	Gas Chromatograph		PENDIENTE VIABILIDAD Y FORMATO DE JUSTIFICACIÓN
1	Separador		PENDIENTE VIABILIDAD Y FORMATO DE JUSTIFICACIÓN
1	Celda Visual o Sight Glass		PENDIENTE VIABILIDAD Y FORMATO DE JUSTIFICACIÓN

3.3. PROPUESTA DE DISEÑO O ADECUACIÓN

En este apartado se explica con mayor detalle los requerimientos funcionales de acuerdo con las pruebas que se desean realizar. También se expone la alternativa de diseño por los desarrolladores del presente informe.

3.3.1. Solicitud del usuario

Figura 17. Esquema solicitado



Fuente: Ecopetrol

- Dimensiones del Slim: 30 pies de tubería de media pulgada de diámetro.
- Volumen a empaquetar: 1.2 Lts aprox.
- Caudales esperados: 0,03 cc/min – 0,3 cc/min (1-10 ft/día).
- Rangos de permeabilidad a trabajar (10 mD – 2000 mD).
- Rangos de Delta P estimados: 4 – 4000 psi
- Monitoreo presión y muestreo en 9 puntos equidistantes.
- Condiciones operacionales, presión y temperatura ambiente.
- Lechos empaquetados, con roca representativa de yacimiento en estudio.

Evaluaciones:

- Obtención de permeabilidad absoluta, RF & RRF
- Recolección y análisis de efluentes. (Emulsiones, finos, condiciones de productos inyectados, grado de degradación, dilución, etc.).

3.3.2. Propuestas en el diseño

Como se describió en el apartado anterior sobre los requerimientos que debe tener el equipo, se realiza una propuesta del Equipo Slim Tube InHouse o temporal como el primer acercamiento, implementando válvulas de control y menos puntos de toma de presión del que se requiere, ya que en el momento se cuenta con una alta prioridad de ejecutar pruebas de desplazamiento en este equipo y dar avances en materia de investigación, en este caso inyección de CDG en medio poroso.

La idea es iniciar pruebas con el Equipo Slim Tube InHouse (alcance de este proyecto). Posteriormente se plantea evaluar la funcionalidad para realizar mejoras puntualmente con adición de más puntos de presión diferencial (aumento de transmisores de presión, electroválvulas, tubing y accesorios).

El esquema del desglose de piezas que se puede apreciar en la Figura 11 realizado en el software Microsoft Office Visio tiene como intención rectificar los insumos necesarios, aportando una perspectiva visual clara del diseño que se quiere concluir. Adicionalmente se opta por modelar en 3D el equipo con la herramienta SolidWork (Ver Figura 12) para poder visualizar el espacio que esté toma dentro del laboratorio y ayudar a facilitar la estrategia de las conexiones de tubería, este diseño siendo un factor importante en la disposición de espacio y optimización de los recursos disponibles para la construcción del Equipo Slim-Tube.

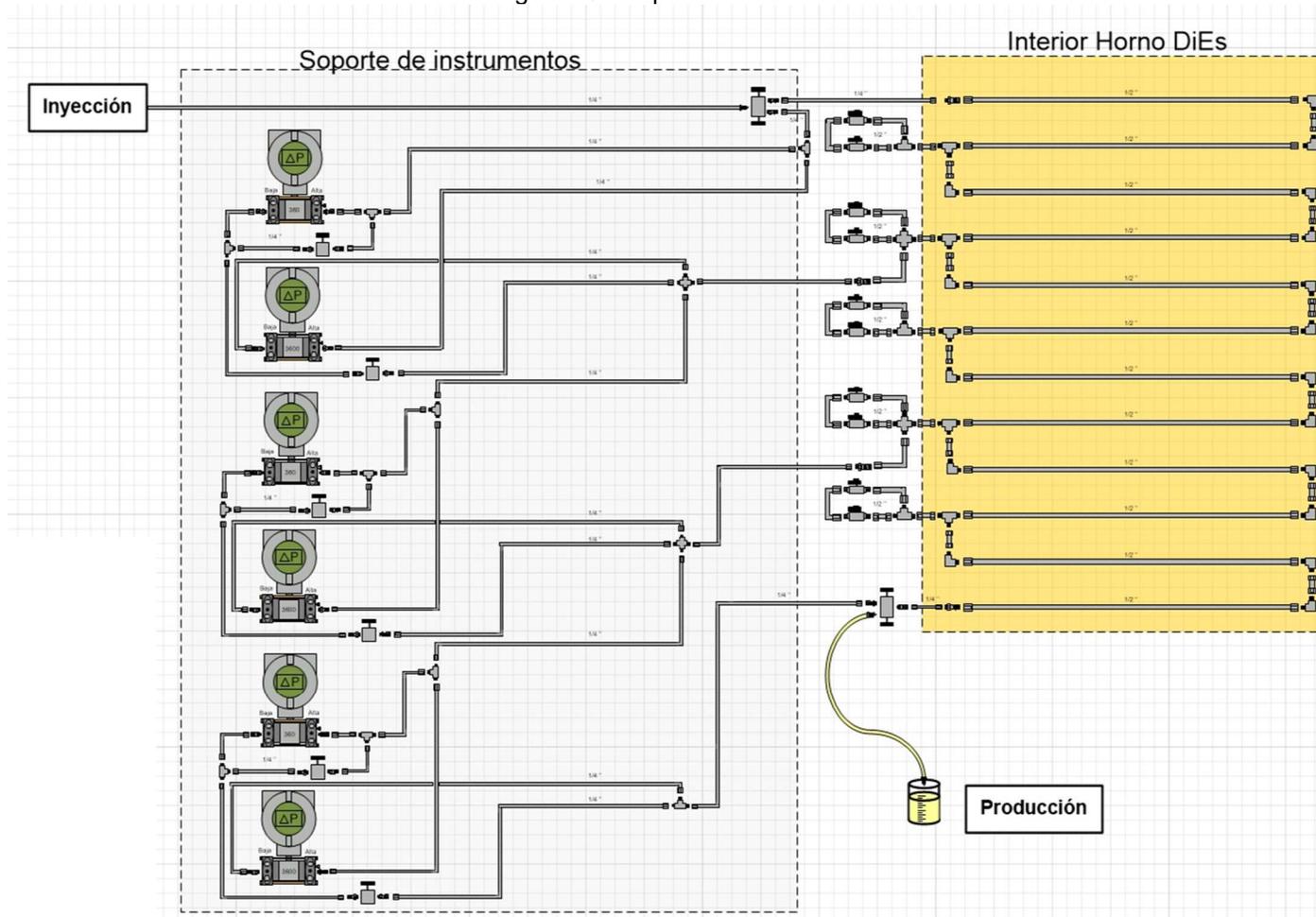
Hasta la fecha en tema de recursos o piezas, se cuenta con la mayoría de partes disponibles para el montaje del equipo InHouse y se lleva un seguimiento de compras para el montaje definitivo.

3.3.3. Planos

En el Anexo B del presente documento se adjuntan los planos respectivos al diseño que se propone en las Figuras 11 y 12.

- Plano General.
- Soporte para el Slim Tube (Tubo delgado)
- Banco para transmisores de presión.

Figura 18. Propuesta de Diseño

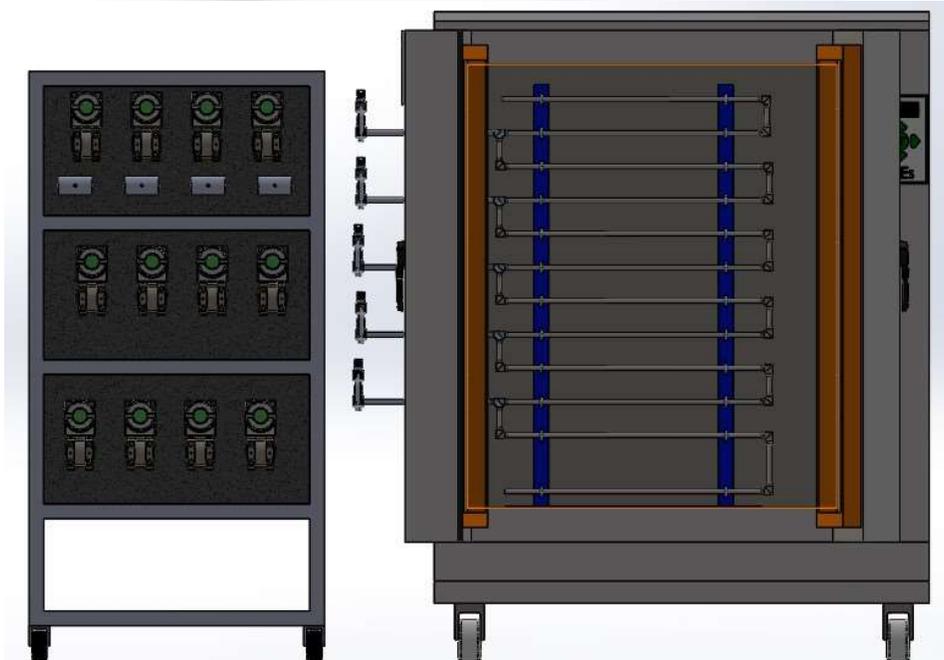
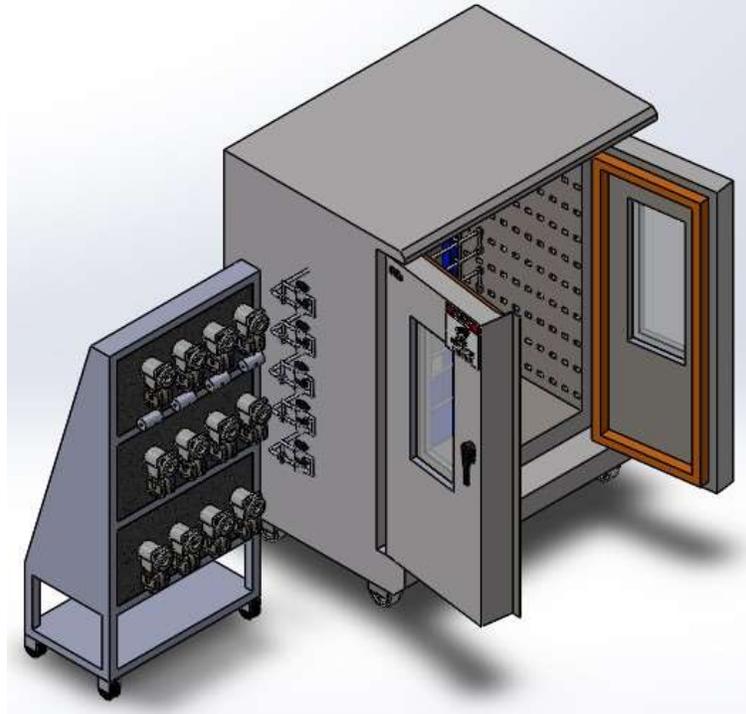


ELABORADO POR:
 Oficina de Investigaciones

REVISADO POR:
 soporte al sistema integrado de gestión

APROBADO POR : Asesor de planeación
 FECHA APROBACION:

Figura 19. Diseño CAD Equipo Slim-Tube, (a) Vista Isométrica (b) Vista Frontal



ELABORADO POR:
Oficina de Investigaciones

REVISADO POR:
soporte al sistema integrado de gestión

APROBADO POR : Asesor de planeación
FECHA APROBACION:

3.4. INSTALACIÓN DEL EQUIPO SLIM-TUBE

Como se tiene preestablecido y definido las partes que componen este tipo de equipos, se tuvieron en cuenta varias alternativas para la construcción en varios aspectos, realizando un análisis de viabilidad para cumplir los requerimientos necesarios para su operación antes de su instalación.

Esta sección se dividirá en subtarear que nos ayudara a clasificar las actividades que se tienen que realizar, optimizando y dando una organización de esta manera darle un buen manejo al tiempo que se tiene para cumplir el objetivo de instalación del equipo.

- a) Slim Tube (Tubo delgado)
- b) Toma muestras
- c) Banco de presión diferencial
- d) Back pressure

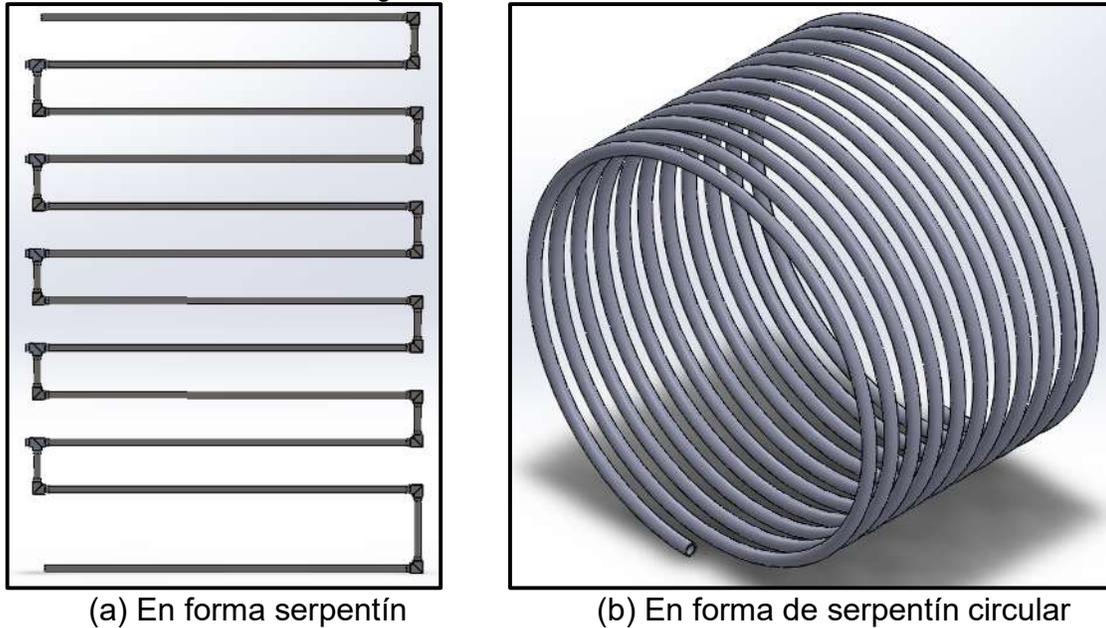
3.4.1. Slim Tube (Tubo delgado)

En cuanto al tubing que contiene el medio poroso su diámetro y longitud ya están anteriormente definidas por el cliente (Diámetro: 1/2", Longitud: 30ft), en cuanto a su geometría y material se tienen varias propuestas para su desarrollo, como se explica a continuación.

3.4.1.1. Geometría

En la Figura 13 se toman dos opciones de diseño para el slimtube que se ajusta a las dimensiones internas del horno (Ver Anexo C) cumpliendo este requerimiento y asegurando el espacio que va ocupar, se opta por evaluar otros conceptos viables para facilitar su uso en la preparación y operación de ensayos como los siguientes: Facilidad de empaquetado y de ensamblaje.

Figura 20. Geometría SlimTube



Fuente: Autor

En forma de serpentin circular (coil) se descartó por la falencia de su difícil empaquetado, especialmente por su forma, este proceso era complejo de ejecutar como sucedía con el antiguo equipo hoy en día desmantelado, experiencia de analistas que ejecutaron pruebas con el slimtube en forma de coil comentan del tiempo tan extenso que utilizaban para lograr un buen empaquetado.

Por esta razón se opta por implementar la configuración en forma de serpentin recto ya que se gestiona invertir en una máquina neumática compactadora de arena para tubos rectos a una presión de 120 psi, esta alternativa el 90% de las actividades de empaquetado con máquina y el restante de forma manual, optimizando el tiempo de esta tarea.

3.4.1.2. Material

Definida la forma del Slimtube se observan las posibles opciones en los que se podría construir, revisando las variables de servicio soportadas dadas por los fabricantes, como también características de los codos disponibles para cada material que se podría utilizar.

Figura 21. Posibles materiales SlimTube



(a) Acero Inoxidable

Variables de servicio
Presión: hasta 3700 psi
Temp: hasta 537°C
Codo enroscado

(b) PVC

Variables de servicio
Presión: hasta 1600 psi
Temp: hasta 60°C
Codo sellado con
pegante
Fuente: Anexo XX

(c) Acero galvanizado

Variables de servicio
Presión: hasta 2000 psi
Temp: hasta 500 °C
Codo enroscado

Tomando en cuenta las características de los materiales propuestos se determina que el acero inoxidable es la opción más viable para construir el Slim Tube, ya que soportará la presión y temperatura necesaria en los ensayos (0-3600 psi y 25°C-200°C), se determina obtenerlos (tubing y accesorios) por la marca Swagelok, reconocida y confiable por años en la compañía.

3.4.1.3. Corte de tubing

Para el corte del tubing se debe realizar con la herramienta de corte precisa, para que el mecanizado realizado sea de calidad y no desperdiciar los insumos, para esto se utiliza la herramienta presentada en la Figura 15 adaptable para tubing de 1/8" hasta 1/2". Para diámetros menores de tubería se recomienda utilizar otra herramienta de corte para no tener deformaciones en la tubería.

Figura 22. Herramienta de corte

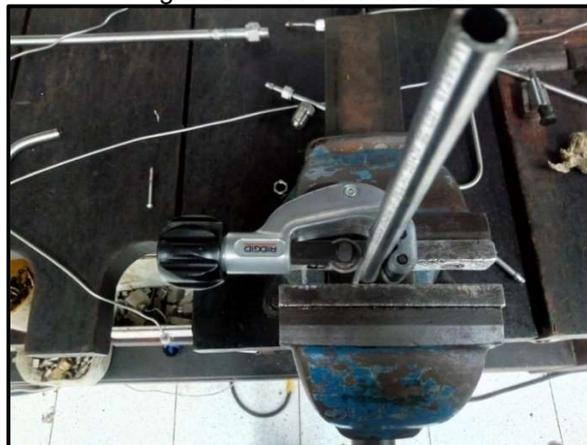


Fuente: Autor

PROCEDIMIENTO

- a) Ajustar el tubing en una prensa
- b) Realizar limpieza en el área de corte
- c) Se utiliza la herramienta de corte girando inicialmente una vuelta dejando marcado el recorrido.
- d) Una vez hecho el recorrido se reajusta con la perilla seguido de tres vueltas más, repitiendo este paso hasta conseguir el corte definitivo.
- e) Luego de que el corte sea efectivo, se lima el área transversal en el que fue hecho y así asegurar la eliminación de impurezas y residuos ocasionados por el mecanizado.

Figura 23. Posición de corte

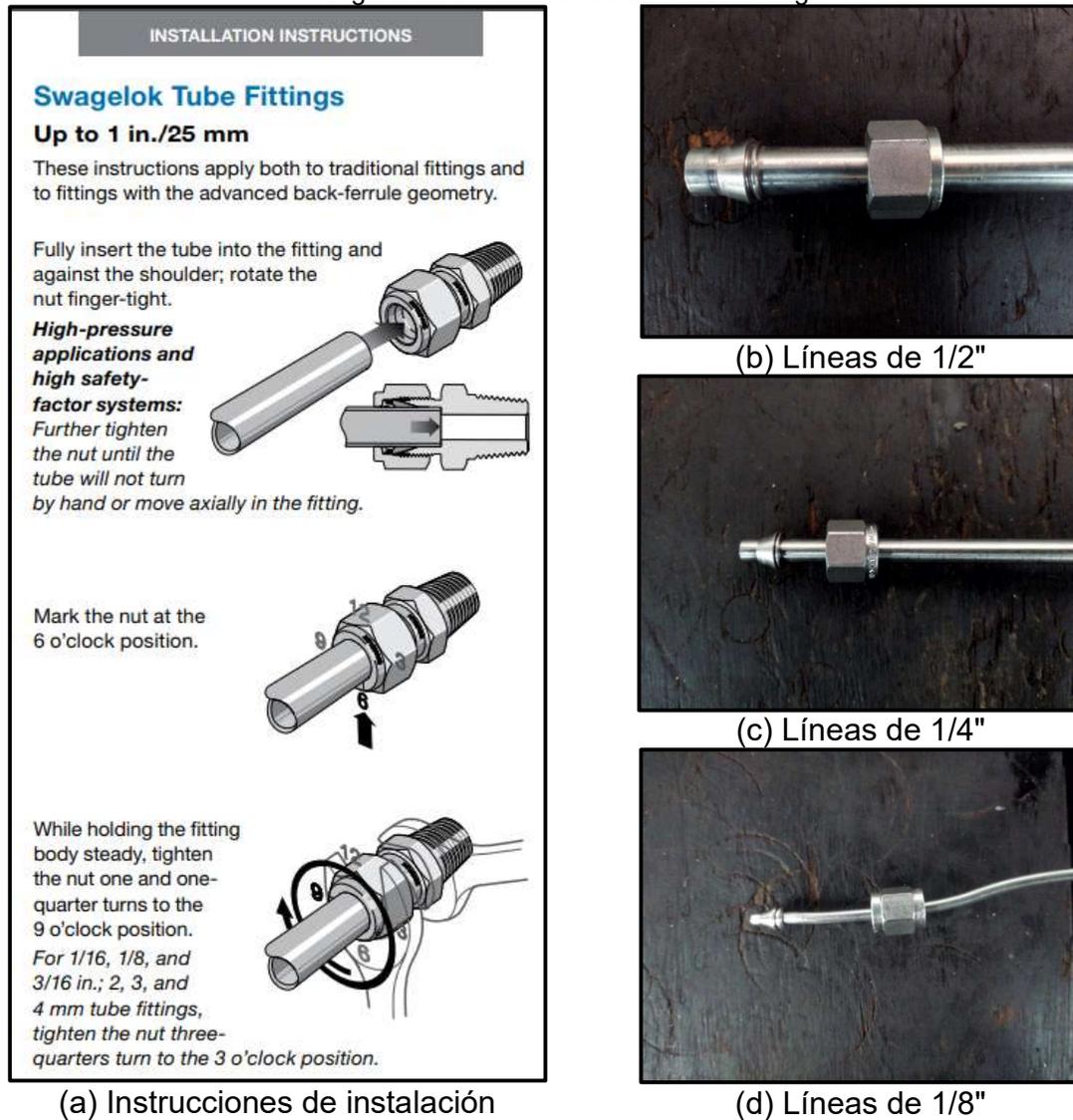


Fuente: Autor

3.4.1.4. Montaje de Férulas y Contra férulas

Para las uniones de tubing con los accesorios (codos, tees, cruces) es necesario instalar férulas y contra férulas en cada extremo del tubing para evitar fugas, se realiza ajustando una vuelta y un cuarto como lo indica el catálogo de Swagelok (Véase Figura 27).

Figura 24. Instalación de sellos de tubing



Fuente: Autor

3.4.1.5. Construcción y ensamblaje

Definida la geometría, dimensiones y espacio a ocupar se busca la manera de soportar todo el Slimtube. Teniendo en cuenta que el horno no presenta manera de poderlo fijar, se envían planos para construir una base en la dependencia de mantenimiento con mordazas mecánicas ajustadas con tornillería de llave Bristol muy útiles para el sostenimiento de tubing, la base se diseña para soportar el peso del Slim tube de aproximadamente unos 10kg ya empaquetado totalmente y para que no venza la inercia de la base.

Figura 25. Ensamble final Slim Tube



(a) Slimtube en proceso de ajuste en mantenimiento



(b) Slimtube terminado al interior del horno

Fuente: Autor

En la figura 18 se ve el proceso de adecuado de estas mordazas ya que deben quedar precisas por donde van a pasar los tubing horizontales, ya que de otra manera se tendrían desigualdades con los orificios realizados al horno industrial por donde estará conectado con la instrumentación del banco de medición.

3.4.2. Toma Muestras

La función de los toma muestra es recolectar una cantidad de fluido considerable en el trayecto del slimtube para su posterior análisis de concentraciones. En la figura 19 se aprecia el ensamble de estos con las instrucciones anteriores ya mostradas de corte y doblado de tubing, montaje de férulas y contra férulas a sus extremos para la unión a válvulas y tees

Figura 26. Ensamble Toma muestras



Fuente: Autor

Se gestionan soportes por medio de planos con la empresa INAL, exclusivamente para fijar cada juego de toma muestras, estos posteriormente instalados atornillados a la cara lateral del horno industrial donde van ubicados según el modelo planteado. (Ver figura 20).

Figura 27. Montaje de Toma muestras



Fuente: Autor

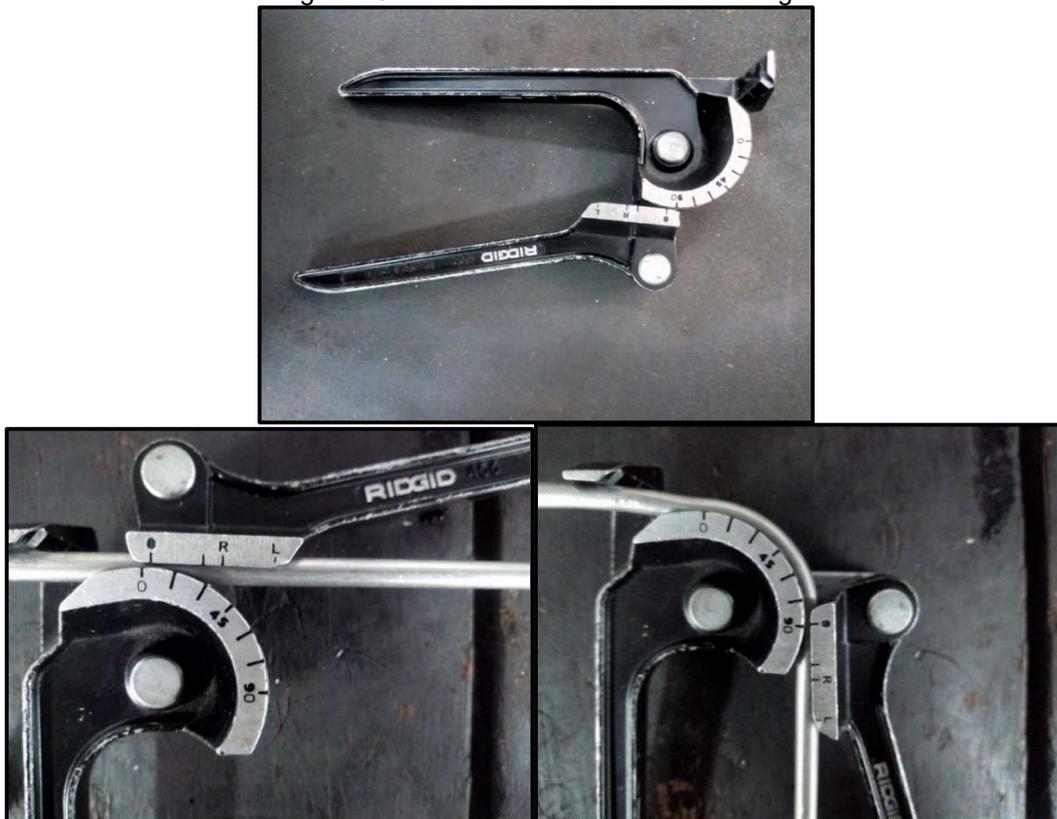
3.4.2.1. Doblado de tubing

Para el doblado de tubing se debe realizar con la herramienta especializada para esta función, esta es la mostrada en la figura 21 con un radio de redondeo de 4.5cm y con la que se realizar el doblado de los tubing que componen cada juego de toma muestras mostradas en la figura 19.

PROCEDIMIENTO

- a) Una vez cortado el tubing y teniendo una medida donde deberá ir ubicado el doblez teniendo en cuenta el radio de curvatura, se procederá a situar y fijar el tubing en esta herramienta en la marca 0 grados.
- b) Aplicar una fuerza realizando el recorrido del doblado del tubing
- c) Finalizar cuando la marca nos muestre el ángulo que se desea obtener, 45° o 90° regularmente.

Figura 28. Herramienta dobladora de tubing



Fuente: Autor

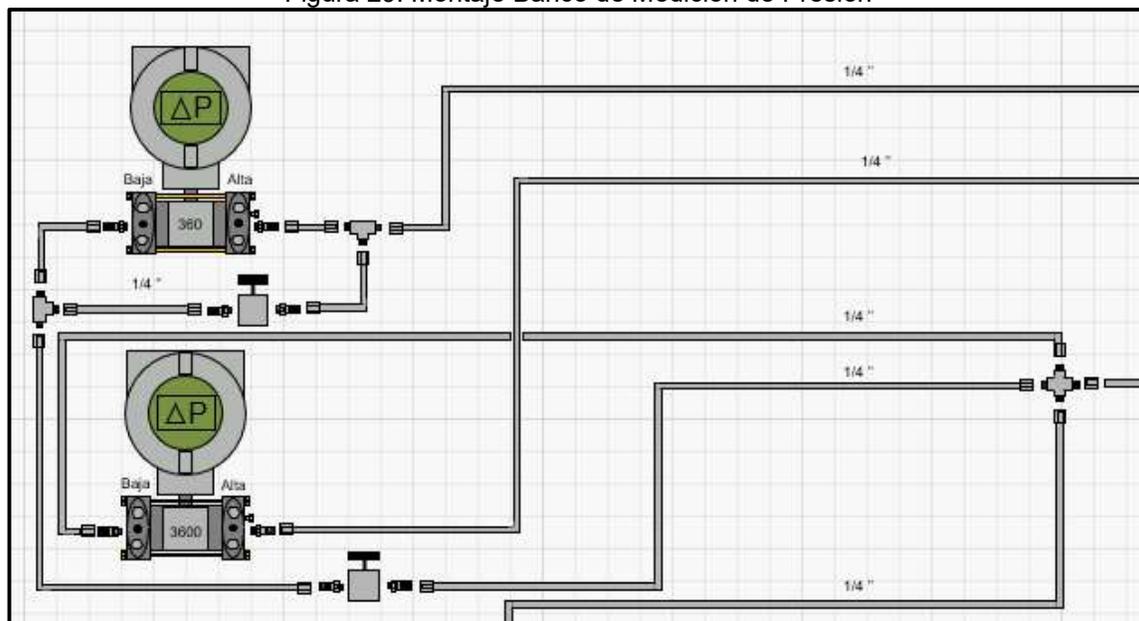
3.4.3. Banco de presión diferencial

El banco de medición de presión diferencial en esencia es la parte de instrumentación del Equipo Slimtube constituido por transductores de marca SMAR para monitorear la presión del sistema, está compuesto por parejas de dispositivos de 360psi y 3600psi con juego de válvulas de dos vías para bypassear la medición del sensor de baja y continuar con el de alta (Ver figura 22a).

Como primera actividad se anclan los sensores a la base como se nota en la figura 22b con tornillería respectiva, posteriormente se realiza la conexión de energía, se utiliza una fuente de 24V para encender estos dispositivos y que estos puedan generar la señal de corriente normalizada de 4mA a 20mA, señal utilizada por el software de adquisición de datos.

Por último, se adecua la tubería de instrumentación para enlazar los SMAR mediante el diseño planeado, esto con la facilidad de herramientas de medición, doblez y corte de tubing para un acabado estético y funcional, en la figura 26c se puede apreciar el resultado obtenido. Este banco queda ubicado en la parte lateral del horno después de los toma muestras.

Figura 29. Montaje Banco de Medición de Presión



(a) Diseño planteado para bypass de sensor de Baja-Alta



(b) Anclaje de sensores SMAR



(c) Banco de instrumentación de medición de presión

Fuente: Autor

ELABORADO POR:
Oficina de Investigaciones

REVISADO POR:
soporte al sistema integrado de gestión

APROBADO POR : Asesor de planeación
FECHA APROBACION:

3.4.4. Back Pressure

El montaje del BPR (Back Pressure Regulator) adicionalmente está constituido por una válvula de 3 vías y un transmisor de presión, En la figura 23b se sitúa una base que lo soportara en una de las rejillas de la parte superior del horno, ubicada cerca a la producción del slimtube intencionalmente donde va conectado.

Figura 30. Montaje BPR



(a) BPR funcional



(b) Soporte interior del horno



(c) Trasmisor de presión



(d) Válvula de inyección de Nitrógeno

Fuente: Autor

3.5 INSTRUCTIVO DE OPERACIÓN

3.5.1 Valoración RAM

La valoración RAM que se alcanza al realizar la revisión de la operación del equipo slim tube es una categoría de riesgo Media con una afectación en personas (M-PE-C3).

CONSECUENCIAS					PROBABILIDAD					
					A	B	C	D	E	
Personas	Economica	Ambiental	Clientes	Imagen de la Empresa	No ha ocurrido en la Industria	Ha ocurrido en la Industria	Ha ocurrido en la Empresa	Sucede varias veces al año en la Empresa	Sucede varias veces al año en la Unidad, Superintendencia o Departamento	
Una o mas fatalidades Nota 1	Catastrofica > \$10M	Contaminación Irreparable	Veto como proveedor	Internacional	5	M ○	M ○	H ○	H ○	VH ○
Incapacidad permanente (parcial o total)	Grave \$1M a \$10M	Contaminación Mayor	Pérdida de participación en el mercado	Nacional	4	L ○	M ○	M ○	H ○	H ○
Incapacidad temporal (<1 día)	Severo \$100k a \$1M	Contaminación Localizada	Pérdida de clientes o desabastecimiento	Regional	3	N ○	L ○	M ○	M ○	H ○
Lesión menor (sin incapacidad)	Importante \$10k a \$100k	Efecto Menor	Quejas y/o reclamos	Local	2	N ○	N ○	L ○	L ○	M ○
Lesión leve (primeros auxilios)	Marginal <\$10k	Efecto Leve	Incumplir especificaciones	Interna	1	N ○	N ○	N ○	L ○	L ○
Ninguna lesión	Ninguna	Ningun efecto	Ningun impacto	Ningun impacto	0	N ○	N ○	N ○	N ○	N ○

3.5.2 Peligros

Algunas de las condiciones o actividades del proceso pueden representar peligros para el personal.

- Líneas y equipos de proceso calientes
- Líneas, cilindros y equipos (backpressure) a alta presión
- Escape de vapores de hidrocarburos
- Drenajes de hidrocarburos
- Partes rotativas de las bombas
- Uso y manipulación de las herramientas de mano
- Liberación de aguas de formación almacenadas en cilindros
- Sobrecarga por levantamiento de brida o cilindros
- Liberación de fluidos por fallas en los sellos

3.5.3 Riesgos

- Quemaduras o irritaciones en la piel por vapor
- Golpes, machucones, contusiones y traumas
- Lesiones osteomusculares o por contacto
- Fracturas, heridas
- Estrés, dolores, cefaleas, náuseas, espasmos musculares, irritabilidad y problemas digestivos.
- Lesiones en tejidos blandos.
- Dermatitis

3.5.4 Controles de Seguridad

- Sistema de monitoreo y control de variables o constantes de proceso (presión y temperatura)
- Extintores móviles y portátiles
- Elementos de Protección Personal
- Máscara para vapores orgánicos
- Pruebas hidrostáticas previas al inicio del proceso
- Avisos informativos de los riegos (No tocar, alta temperatura)
- Inspección visual de conectores, sellos de cilindros, válvulas y o-rings
- Inspección visual de manómetros y termocuplas.
- Limpieza continua de equipos y cilindros
- Realizar pausas activas en el trabajo, descansos, manejo de higiene postural
- Almacenamiento de las herramientas, jornada de Orden y aseo y uso de señales preventivas
- Mediciones anuales de Higiene Industrial

3.5.5 Equipo Personal de Protección EPP's

- Camisa manga larga o bata totalmente cerrada
- Gafas de seguridad
- Botas de seguridad
- Protección auditiva cuando se utilicen las pistolas de aire
- Protección respiratoria con filtro para vapores
- Guantes de nitrilo
- Guantes de vaqueta

3.5.6 Equipos y materiales

La realización de la prueba requiere de los siguientes materiales y equipos:

- Tubing de ½ de pulgada de diámetro y longitud de 30 pies
- Horno de Calentamiento DIES - Slim Tube
- Backpressure
- Bombas de desplazamiento positivo
- Cilindros de inyección de fluidos
- Transductores de Presión diferencial marca SMAR
- Computador con software (OPTO 22)
- Fuente de Nitrógeno
- Colector de Fracciones marca Spectrum Labs
- Fluidos (Polímeros, CDG, KCL, Salmuera sintética, Agua de Formación)
- Válvulas de 2 vías Bypass Smar (V-1A, V-2A, V-3A, V-1B, V-2B, V-3B)
- Válvulas de 3 vías (Inyección, Producción, Coinyeccon y Backpressure)

3.5.7 Operación del Equipo Slim Tube

Este procedimiento describe los pasos e insumos para la operación del Slim Tube, preparación y saturación del medio poroso de acuerdo al yacimiento a utilizar en los diversos ensayos desarrollados en el laboratorio de referencia. Secuencialmente se ha clasificado de la siguiente manera:

- a) Equipos y sistemas necesarios
- b) Preparación de fluidos a utilizar
- c) Montaje de fluidos en cilindros
- d) Preparación del medio poroso
- e) Saturación de líneas para elementos de medición
- f) Configuración de condiciones en OPTO 22

3.5.7.1. Equipos y sistemas necesarios

- Sistema de Aire: El sistema de aire alimenta las válvulas solenoides de la bomba del equipo Slim Tube. El aire es utilizado para el trabajo neumático de todos los dispositivos de control. Es un aire totalmente seco para evitar que se produzca la corrosión que afecte los materiales de los instrumentos. El cabezal de aire de instrumentos distribuye el aire a los equipos a una presión aproximada de 80-120 psig.

- Sistema de Nitrógeno: El nitrógeno es obtenido de un proveedor y es utilizado como gas de presurización del regulador de contrapresión BACKPRESSURE del equipo Slim Tube; igualmente el Nitrógeno industrial se utiliza para la limpieza de filtros de crudo.

3.5.7.2. Preparación de fluidos a utilizar

Una vez especificados los fluidos y cantidades a utilizar para las pruebas realizadas en el laboratorio (Polímeros, CDG, KCL, Salmuera sintética, Agua de Formación, aceite mineral, crudo) definidas en el protocolo del ensayo, las soluciones sintéticas se deben preparar en el laboratorio de química de producción.

En el caso de salmueras se debe tener la composición fisicoquímica del agua del yacimiento para reunir los elementos necesarios y procesarla, en polímeros y KCL se utiliza la ecuación matemática que relaciona volumen y concentración. En ambos casos se diluyen con agua destilada.

$$C_i * V_i = C_f * V_f$$

PROCEDIMIENTO PARA SALMUERA SINTETICA Y KCL

- a) Conocer la composición fisicoquímica del agua del yacimiento a tratar (Ejemplo: Agua de Pia Cebu) o porcentaje de concentración.

Componentes	g/L
NaCl	6,973
KCl	0,114
MgCl ₂ *6H ₂ O	0,515
CaCl ₂ *2H ₂ O	1,012
Salinidad (ppm)	8301
TDS (ppm)	8756

- b) Pesar en la balanza los componentes indicados según la composición físico química o según el porcentaje de concentración que se desea obtener utilizando la ecuación ya mencionada.
- c) Diluir los componentes en un balón o matraz aforado.
- d) Para finalizar filtrar en un Erlenmeyer por membrana de 0.45μ y desairar por 60 minutos

Figura 31. Preparación de Salmuera



(a) Reactivos a utilizar



(b) Pesar en la balanza



(c) Diluir en agua destilada



(d) Filtrar y Desairar

Fuente: Autor

PROCEDIMIENTO PARA CRUDO

- a) Una vez el crudo del yacimiento está a disposición del laboratorio se debe filtrar en un horno, de esta manera aumentar su temperatura y a su vez reducir su viscosidad
- b) Almacenar el crudo en un cilindro y esté conectarlo a la bomba de desplazamiento positivo Gilson.
- c) Fijar una presión no mayor a 100psi (rotura de la membrana) y tasa para hacer pasar el crudo secuencialmente por los filtros de 10μ hasta 4.5μ
- d) Repetir los pasos b y c hasta obtener la cantidad de crudo necesario para las pruebas.

ELABORADO POR:
Oficina de Investigaciones

REVISADO POR:
soporte al sistema integrado de gestión

APROBADO POR : Asesor de planeación
FECHA APROBACION:

PROCEDIMIENTO PARA POLIMERO Y ENTRECruzADOR.

- a) Para preparar polímero se debe hacer una mezcla madre (fluido altamente concentrado, por ejemplo: 5000ppm), este se consigue con la misma metodología explicada en la figura 24.
- b) Mezclar la cantidad de polímero con salmuera sintética o agua de formación proveniente del yacimiento.
- c) Diluir con la máquina agitadora (Figura 25) durante un día para conseguir una mezcla homogénea.
- d) Una vez lista la madre, se diluye aún más para obtener el polímero a la concentración que se tiene predestinada inyectar.
- e) Finalmente, sisallar el polímero preparado (degradación mecánica)

Figura 32. Máquina Agitadora



Fuente: Autor

ELABORADO POR:
Oficina de Investigaciones

REVISADO POR:
soporte al sistema integrado de gestión

APROBADO POR : Asesor de planeación
FECHA APROBACION:

Para finalizar esta sección, todos los fluidos preparados para inyección deben ser analizados por un viscosímetro para conocer su viscosidad real, ya que es un dato importante en el momento del cálculo de la permeabilidad. Estos datos solo necesitan una pequeña muestra de cada fluido y la información es mostrada en pocos minutos. En la figura 26 se muestra es equipo que se utiliza en el Laboratorio de Recobro Mejorado para tal fin.

Figura 33. Viscosímetro



Fuente: Autor

ELABORADO POR:
Oficina de Investigaciones

REVISADO POR:
soporte al sistema integrado de gestión

APROBADO POR : Asesor de planeación
FECHA APROBACION:

3.5.7.3. Montaje de fluidos en cilindros

Los cilindros free pistón de almacenamiento de fluidos son muy útiles en el momento de inyectar, a continuación, se presenta una guía de la apertura segura, limpieza y almacenamiento. (Véase Figura 27)

PROCEDIMIENTO DE LIMPIEZA:

- a) Contar con todos los elementos de seguridad para realizar la operación.
- b) Contar con las herramientas necesarias para desmontar y limpiar el cilindro
- c) Trasladar y fijar el cilindro en una prensa
- d) Abrir válvulas de los extremos lentamente para despresurizar y vaciar el cilindro
- e) Tomar la herramienta indicada para desajustar la tapa superior del cilindro
- f) Una vez abierto el cilindro ubicar el cilindro en el área de lavado para su posterior limpieza
- g) Se enjuaga el cilindro con agua y jabón si son salmueras, si estuvo almacenado con crudo se utiliza Varsol para remover en totalidad las impurezas
- h) Una vez listo su limpieza se procede a secar y remover el agua residual que queda en el interior y exterior del cilindro con ayuda de la pistola de aire comprimido

PROCEDIMIENTO DE ALMACENAMIENTO:

- a) Contar con todos los elementos de seguridad para realizar la operación.
- b) Contar con las herramientas necesarias para montar el cilindro
- c) Trasladar y fijar el cilindro en una prensa
- d) Cerrar una de las válvulas del cilindro
- e) Verificar que el pistón este totalmente en la parte inferior y proceder al almacenamiento del fluido a inyectar
- f) Con la válvula de la tapa abierta se procede a ajustar el cilindro con la herramienta indicada
- g) Una vez la tapa queda ajustada, se cierra la válvula de la tapa y se transporta para su base
- h) Se realiza las conexiones con la bomba de desplazamiento positivo desde su válvula inferior y queda solo supervisar que no haya fugas mientras se transcurre la prueba.

Figura 34. Desmontaje y limpieza de cilindros



(a) Sujetar en una prensa



(b) Despresurizar y vaciar cilindro



(c) Apertura



(d) Transportar a limpieza



(e) Líquido de limpieza



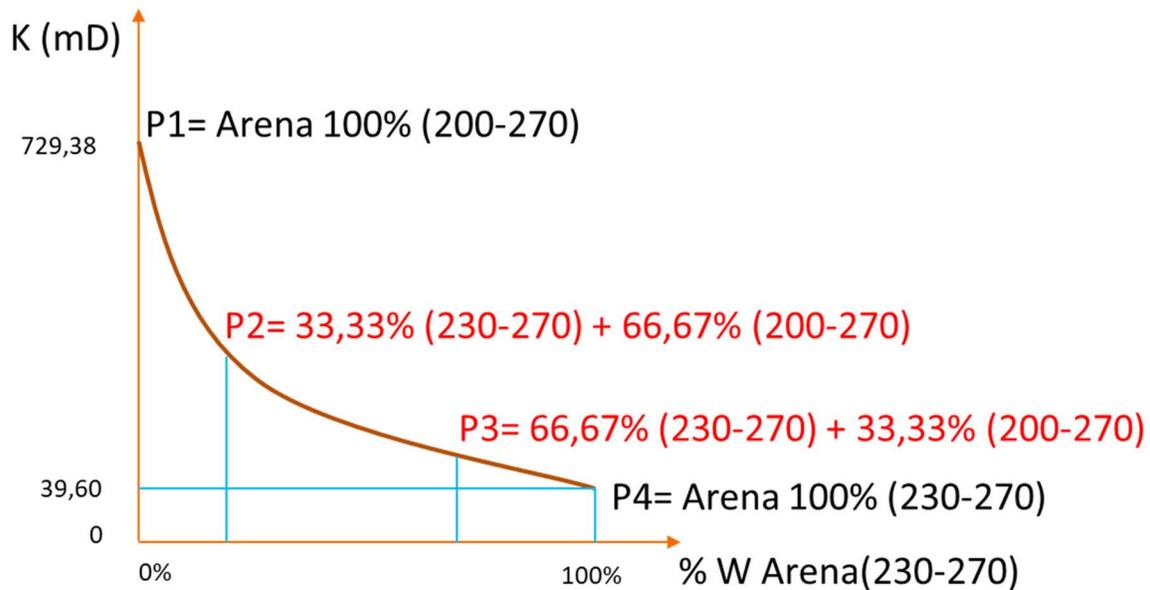
(f) Limpieza de cilindro

Fuente: Autor

3.5.7.4. Preparación del medio poroso

Al realizar una prueba de desplazamiento en el Slimtube implica simular la misma permeabilidad de la roca que se encuentra en los pozos analizados en el laboratorio, en base a lo anterior el tubing de 30 pies tiene esta condición y se cumple por medio de una ecuación construida de una regresión polinomial utilizando arena Ottawa de diferente mesh. Para explicarlo mejor se tiene la siguiente gráfica:

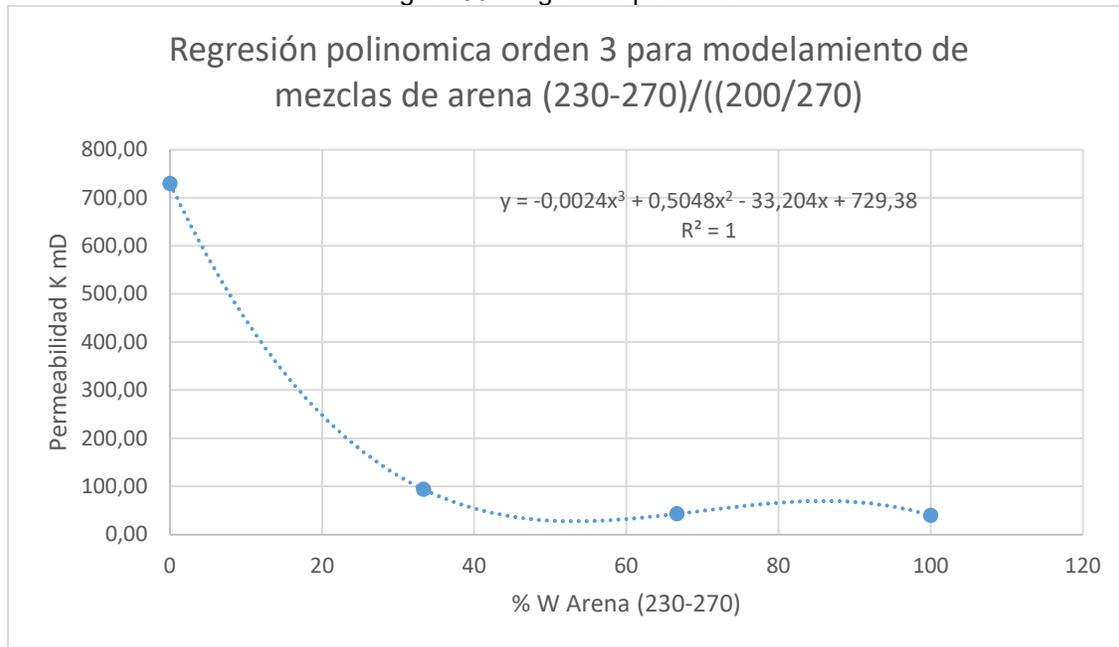
Figura 35. Curva característica de arenas



Fuente: Laboratorio de Recobro Mejorado

Cada punto que se observa sobre la curva representa pruebas individuales de permeabilidad utilizando tubing empaquetados con dos mesh de arena Ottawa a diferentes porcentajes, en este ejemplo se realiza la regresión con 4 puntos, es claro que si se requiere una estricta precisión en la permeabilidad se tendrán a consideración un aumento de estos y por ende mayor tiempo en estas pruebas para obtener la ecuación.

Figura 36. Regresión polinómica



Fuente: Laboratorio de Recobro Mejorado

PROCEDIMIENTO EMPAQUETADO DE TUBING

- a) Definir el campo de estudio y por ende su permeabilidad promedio, sabiendo esto se utiliza la ecuación que surge de la regresión para determinar la relación de arena Ottawa a utilizar. Ejemplos:

Permeabilidad promedio de los campos de estudio	
Dina-Cretáceos	58mD
Yarigí	105mD
Casabe (Arenas B)	110mD
Palograndé-Cebú	78mD

- b) Hacer uso de la máquina compactadora para las actividades de empaquetado de tubing siguiendo la metodología presentada en el Anexo A
- c) Posicionar el tubing en la máquina con una malla en la parte inferior de menor rango al mesh de las arenas utilizadas, de esta manera garantizar la compactación y la optimización del recurso.
- d) Se utiliza la máquina ingresando la mezcla de arenas inicialmente 10ml luego compactar 10sg, luego de a 5ml compactando 10 sg hasta el otro extremo del tubing

- e) Ya los tubing de 2.3ft, 0.2ft y 0.4ft hayan sido empaquetados se procederá a ensamblar el Slim Tube en sentido de la parte inferior a la superior empaquetando de forma manual los accesorios que lo componen (codos y tees).

Figura 37. Empaquetado de tubing



(a) Tipos de Arena Ottawa a utilizar



(b) Máquina Compactadora



(c) Montaje del tubing



(d) Empaquetado de codos

Fuente: Autor

3.5.7.5. Saturación de líneas para elementos de medición

ELABORADO POR:
Oficina de Investigaciones

REVISADO POR:
soporte al sistema integrado de gestión

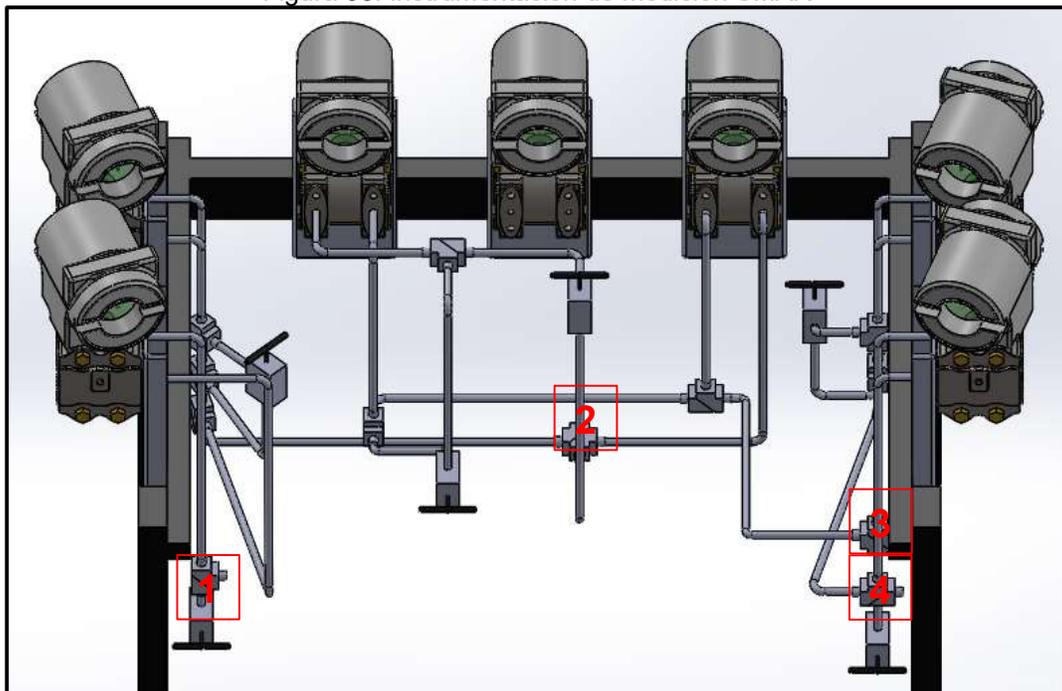
APROBADO POR : Asesor de planeación
FECHA APROBACION:

Las líneas de instrumentación que van directo a los Smar deben ir previamente saturadas con aceite mineral filtrado y desairado, evitando el contacto de cualquier clase de fluido de inyección ya que podrían ocasionar desgaste en sus componentes internos del dispositivo y por ende desviar la toma de datos por presencia de aire o residuos sólidos.

PROCEDIMIENTO:

- a) Contar con todos los elementos de seguridad para realizar la operación.
- b) Contar con herramientas y elementos necesarios para el montaje.
- c) Contar con la bomba Enerpac cargada con aceite mineral desairado
- d) Sellar tres de las cuatro salidas que tiene el panel de instrumentación
- e) Aliviar una por una las cámaras de almacenamiento de aceite en cada uno de los Smar.
- f) Después de ver salir únicamente aceite sin residuos o burbujas de aire por el orificio de alivio de los Smar volver ajustar el tornillo.
- g) Terminada la actividad desinstalar cada uno de los elementos y dejar organizado el sitio donde se realizó la operación.

Figura 38. Instrumentación de medición SMAR



Fuente: Autor

3.5.7.6. Configuración de condiciones en OPTO 22

ELABORADO POR:
Oficina de Investigaciones

REVISADO POR:
soporte al sistema integrado de gestión

APROBADO POR : Asesor de planeación
FECHA APROBACION:

Este sistema de adquisición de datos implementado para el Slimtube está conformado por cuatro paneles claves (Figura 33) que son los siguientes:

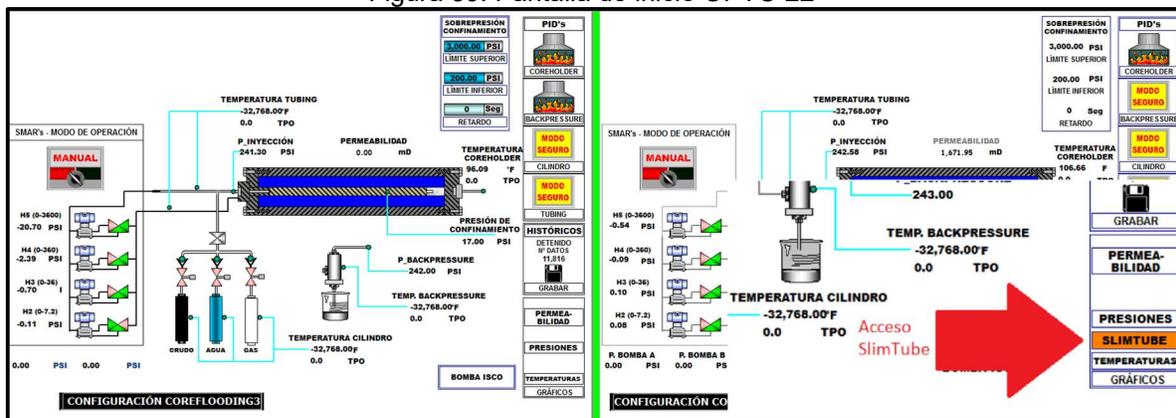
1. Panel de configuración de la prueba
2. Panel de visualización de datos de presión de cada SMAR
3. Panel de visualización grafica de variables con el tiempo
4. Panel de condiciones de operación del Equipo

Las instrucciones de operación que se encuentran en las siguientes páginas corresponden al procedimiento básico de operación del Sistema de Control Automático "OPTO 22" del área de Recobro mejorado.

PROCEDIMIENTO:

- a) Encender el computador y entrar a Windows, abrir la ventana "Opto display run time", la cual es la interfaz gráfica de usuario.
- b) En vista que esta enlazado con el monitoreo de los Coreflooding del laboratorio se debe seleccionar la opción Slim Tube (Figura 32)

Figura 39. Pantalla de inicio OPTO 22



Fuente: Autor

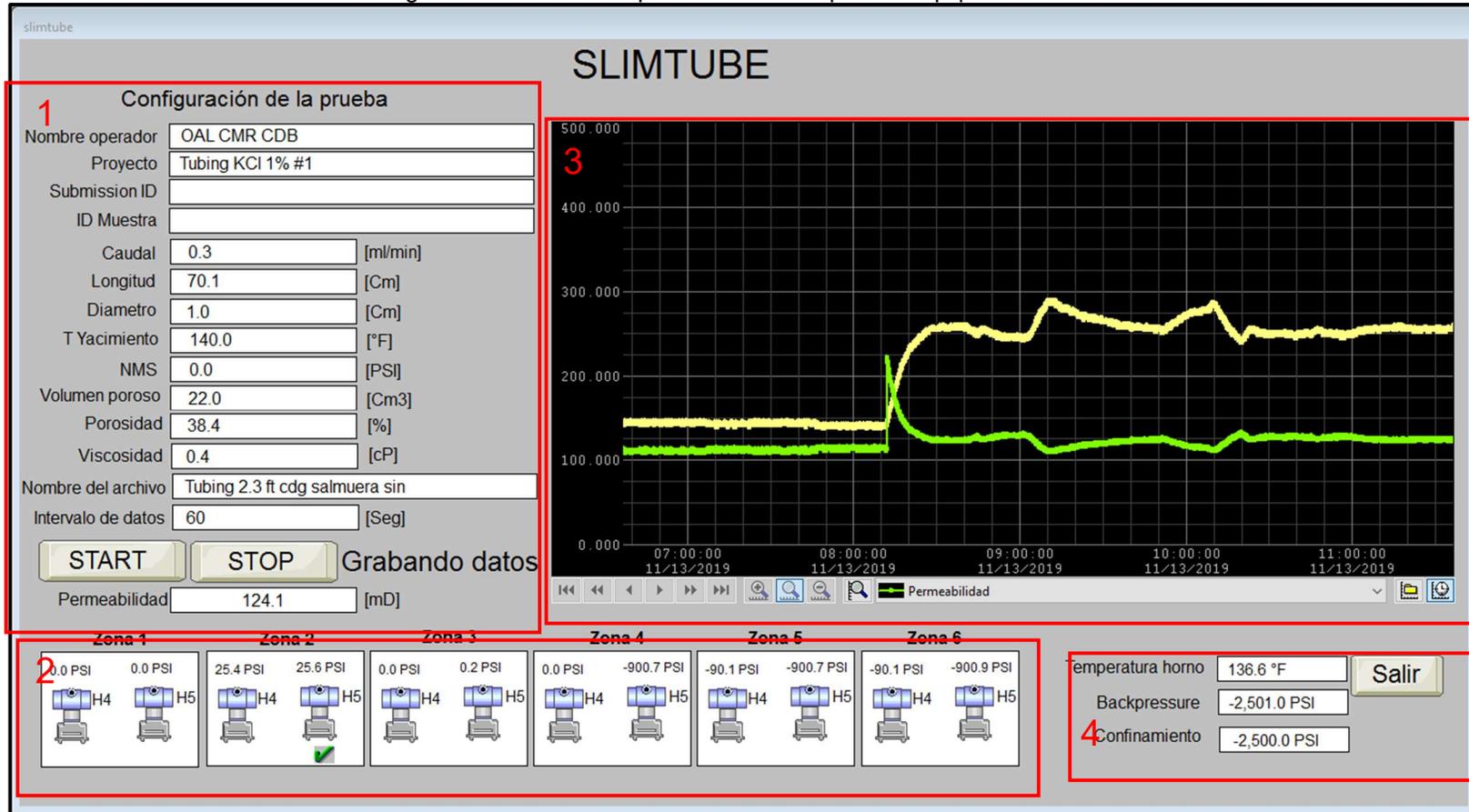
- c) Verificar que no se muestren mensajes de error
- d) Corroborar el buen funcionamiento del sistema de control teniendo en cuenta las lecturas de los instrumentos de temperatura y presión.
- e) Llevar el equipo a condiciones de operación:

- ❖ Temperatura: La temperatura se ajusta gradualmente mediante el sistema de calentamiento que tiene el horno del Slim tube, se inserta el valor de

- la temperatura deseada, a medida que aumenta la temperatura verificar que el sistema alcance la presión de producción.
- ❖ Verificar en el sistema de control y adquisición de datos la presión de inyección y producción.
- f) Luego de llevar a condiciones de operación, llenar los datos de la prueba que se requieren en la ventana antes de iniciar la grabación de datos:
- ❖ Nombre operador: Analista encargado de desarrollar el desplazamiento
 - ❖ Proyecto: Descripción breve de la prueba
 - ❖ Submission ID: Identificación de la familia de las muestras de roca
 - ❖ ID muestra: Identificación única de las muestras de roca
 - ❖ Caudal: Tasa de flujo a la que se realizará el desplazamiento
 - ❖ Longitud: Tamaño del Slim Tube
 - ❖ Diámetro del tubing
 - ❖ Temperatura de trabajo: Generalmente es la temperatura del yacimiento
 - ❖ Volumen poroso: Volumen en fluido que pueden almacenar el medio poroso empaquetado
 - ❖ Porosidad: Porcentaje de huecos existentes en el mismo frente al volumen total
 - ❖ Viscosidad fluido: viscosidad del fluido de inyección
 - ❖ Nombre del Archivo: Proyecto con identificación de las muestras de roca
 - ❖ Intervalo de datos: El analista decide el tiempo en el que se deben guardar los datos de acuerdo al ensayo que se está realizando.
 - ❖ Permeabilidad Klinkenberg: Capacidad de un medio para permitir el flujo de fluidos a través de él
 - ❖ Presión trabajo: Presión inicial para determinar la MPM
- g) Iniciar la captura de datos de la presión de los sensores de presión ubicado en la parte entre inyección y producción del sistema para esto oprimir el botón START
- h) Finalmente, los datos quedan almacenados en el disco duro, con el nombre que se especificó en la opción Nombre del archivo; los datos de prueba con extensión csv pueden ser descargados para su posterior edición.
- i) Para salir del programa, oprima el botón SALIR de la ventana principal.

Nota: Todas las gráficas de monitoreo de variables e históricos permanecen almacenadas (1) un mes, después de este tiempo se borrarán automáticamente

Figura 40. Panel de adquisición de datos para el Equipos SimTube



ELABORADO POR:
Oficina de Investigaciones

REVISADO POR:
soporte al sistema integrado de gestión

APROBADO POR : Asesor de planeación
FECHA APROBACION:

3.6. PRUEBAS PRELIMINARES

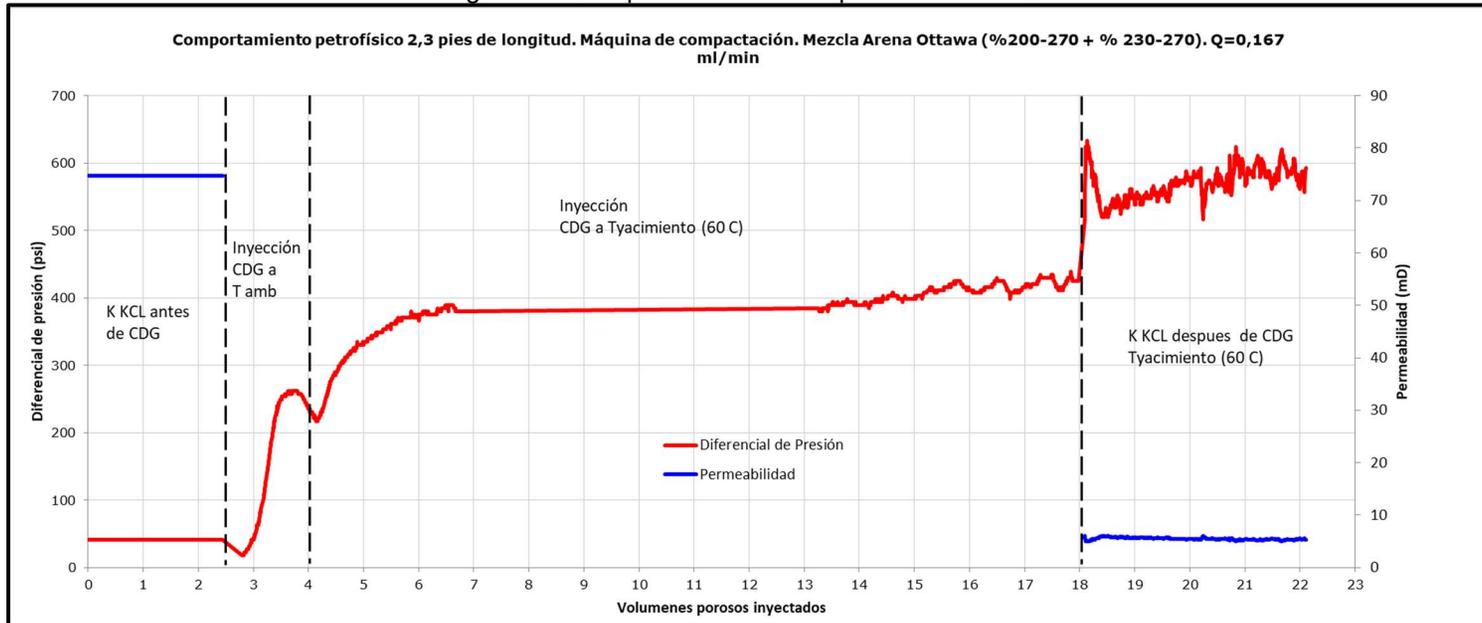
3.6.1. Prueba #1

- ✓ Empaquetado con mezcla de arena Ottawa 71,2% (230-270) y 28,8 % (200-270)
- ✓ **VP** = 21,9 mL
- ✓ **K** = 74,76 mD

- ✓ Fluido de Inyección: Salmuera sintética PIA CEBÚ
- ✓ Co-inyección de solución polimérica Flopaam 6035s (400ppm) y entrecruzador

- Citrato de Aluminio relación 40:1.
- ✓ No se detectó polímero en los efluentes.

Figura 41. Comportamiento de la presión Prueba #1



ELABORADO POR:
 Oficina de Investigaciones

REVISADO POR:
 soporte al sistema integrado de gestión

APROBADO POR : Asesor de planeación
 FECHA APROBACION:

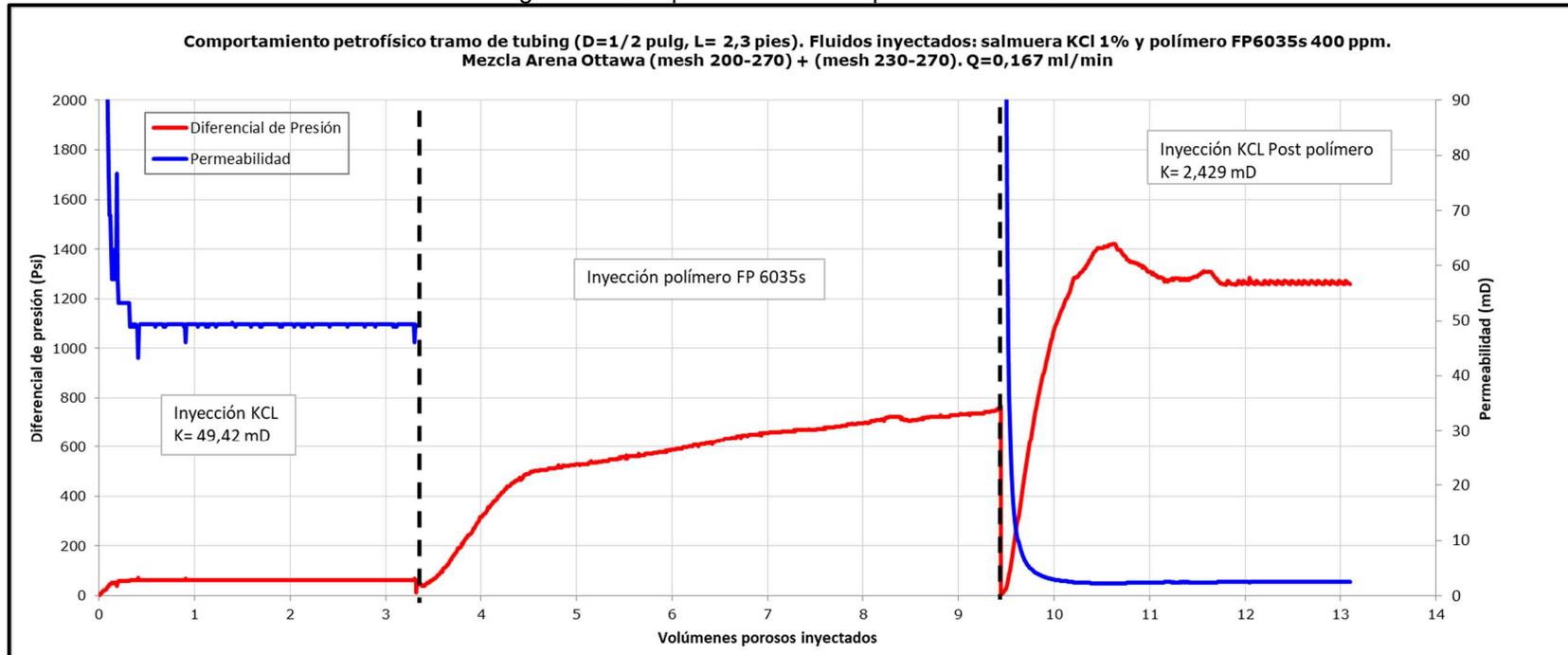
3.6.2. Prueba #2

- ✓ Empaquetado con mezcla de arena Ottawa 71,2% (230-270) y 28,8 % (200-270)
- ✓ VP = 18,5 mL
- ✓ K = 49,42 mD

- ✓ Fluido de Inyección: Salmuera sintética PIA CEBÚ
- ✓ Inyección de solución polimérica Flopaam 6035s (400ppm).

- ✓ Se detectó polímero en los efluentes, a los 6VP se llegó a la concentración inicial inyectada.

Figura 42. Comportamiento de la presión Prueba #2



ELABORADO POR:
 Oficina de Investigaciones

REVISADO POR:
 soporte al sistema integrado de gestión

APROBADO POR : Asesor de planeación
 FECHA APROBACION:

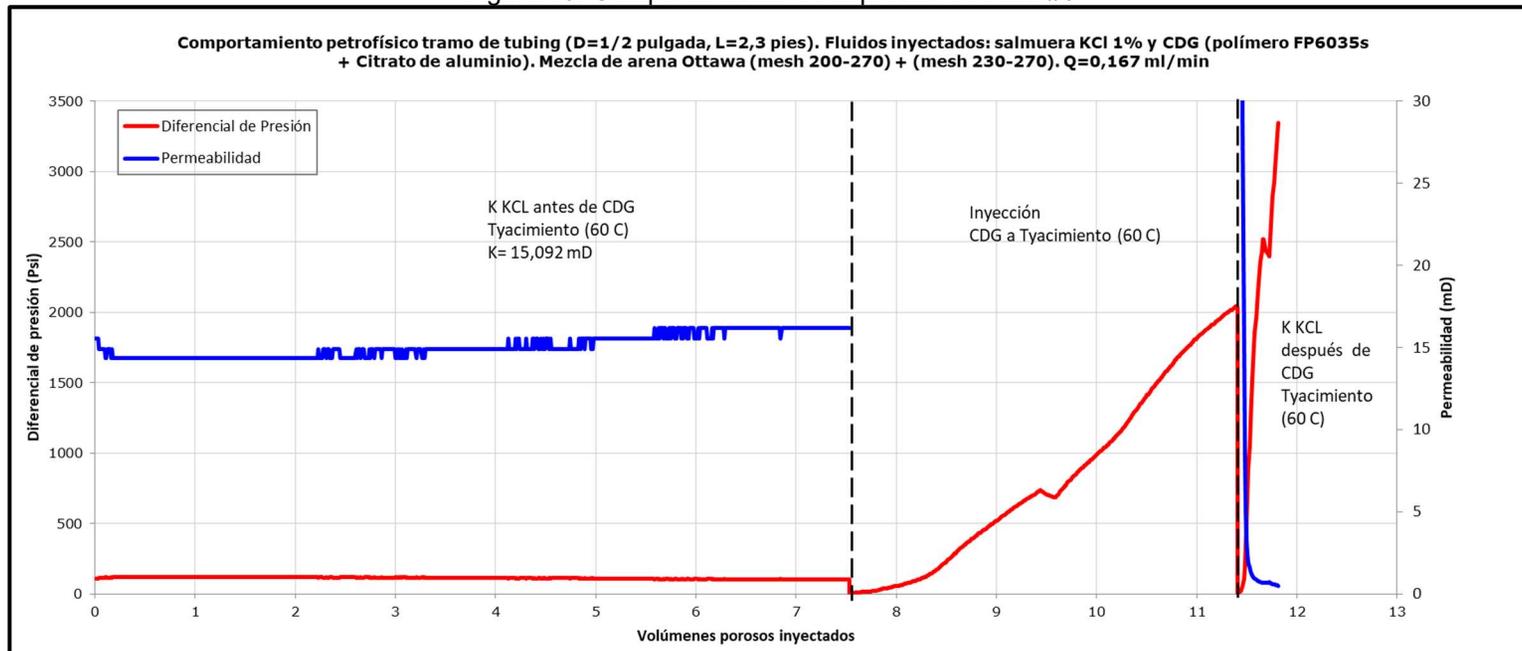
3.6.3. Prueba #3

- ✓ Empaquetado con mezcla de arena Ottawa 71,2% (230-270) y 28,8 % (200-270)
- ✓ VP = 17,81 mL
- ✓ K = 15,092 mD

- ✓ Fluido de Inyección: Salmuera sintética PIA CEBÚ
- ✓ Co-inyección de solución polimérica Flopaam 6035s (400ppm) y entrecruzador

- Citrato de Aluminio relación 40:1.
- ✓ No se detectó polímero en los efluentes

Figura 43. Comportamiento de la presión Prueba #3



ELABORADO POR:
Oficina de Investigaciones

REVISADO POR:
soporte al sistema integrado de gestión

APROBADO POR : Asesor de planeación
FECHA APROBACION:

3.6.4. Prueba #4

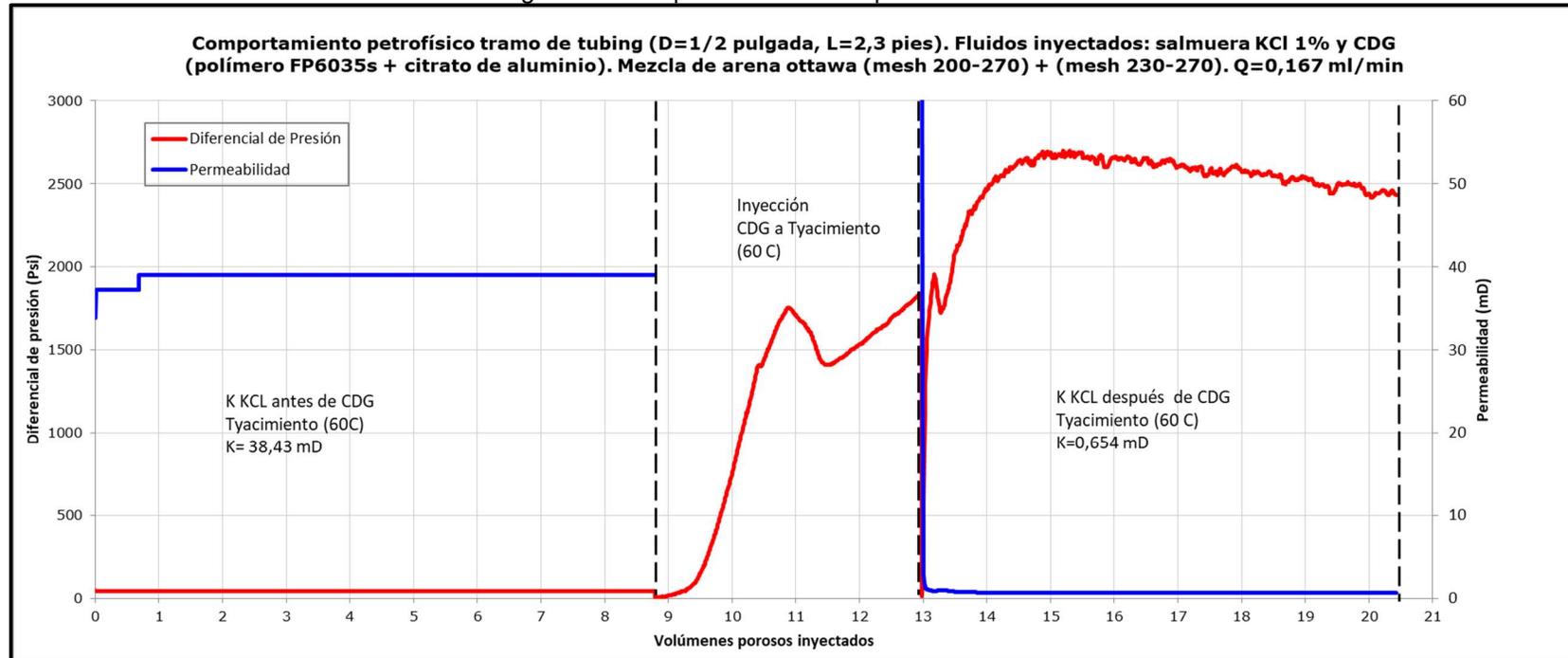
- ✓ Empaquetado con mezcla de arena Ottawa 71,2% (230-270) y 28,8 % (200-270)
- ✓ VP = 18,89 mL
- ✓ K = 38 mD

- ✓ Fluido de Inyección: Salmuera sintética PIA CEBÚ
- ✓ Co-inyección de solución polimérica Flopaam 6035s (400ppm) y entrecruzador

Citrato de Aluminio relación 40:1.

- ✓ No se detectó polímero en los efluentes.

Figura 44. Comportamiento de la presión Prueba #4



ELABORADO POR:
Oficina de Investigaciones

REVISADO POR:
soporte al sistema integrado de gestión

APROBADO POR : Asesor de planeación
FECHA APROBACION:

4 RESULTADOS

El proceso realizado para la adecuación del equipo Slim Tube fue necesario para obtener pruebas de movilidad en el laboratorio de recobro mejorado, cada una de sus partes instaladas según los requerimientos del cliente y del diseño propuesto en este proyecto. En las figuras 45 y 46 se observa el resultado final del montaje del equipo Slim Tube con sus dos bombas de desplazamiento positivo y ordenadores para el control de estas, el horno industrial con sus cilindros y Tubo empacado a temperatura del yacimiento y el panel de medición de presión diferencial con los sensores marca SMAR.

Figura 45. Montaje equipo Slim Tube



Fuente: Autor

Figura 46. Montaje equipo Slim Tube



Fuente: Autor

ELABORADO POR:
Oficina de Investigaciones

REVISADO POR:
soporte al sistema integrado de gestión

APROBADO POR : Asesor de planeación
FECHA APROBACION:

5 CONCLUSIONES

- Con la adecuación del Equipo Slim Tube en su primera fase se podrán desarrollar análisis de movilidad, desplazamiento de fluidos, cálculos de permeabilidad, cálculos de factor de resistencia y factor de resistencia residual en el Laboratorio de Recobro Mejorado.
- Con el propósito de ejecutar pruebas de CDG en el Laboratorio de Recobro Mejorado se requieren varias tomas de conexión eléctrica a 120VAC cercanos para tener en funcionamiento los equipos periféricos necesarios para la ejecución de pruebas. Se recomienda realizar la gestión para que se pueda adecuar un nuevo punto de conexión donde se tiene ubicado el Equipo Slim Tube.
- Con el diseño CAD (Computer Assistant Design) del Equipo dejado a disposición de personal del laboratorio para el montaje de la prueba de coinyección de CDG en el Equipo Slim Tube junto con el instructivo de operación se puede utilizar para capacitación de nuevo personal dentro del laboratorio en este tipo de pruebas.
- Los instrumentos de medición que se utilizaron para constituir el panel de instrumentación del equipo, garantizan una alta precisión y control de las diversas variables que se manejan en el estudio de desplazamiento de fluidos, permitiendo un control global de cada prueba desarrollada.
- Según los resultados presentados en las pruebas preliminares del equipo evidencian el correcto funcionamiento y sincronización entre los sensores y el software de adquisición de datos instalados, teniendo el analista fiabilidad de los instrumentos podrá presentar resultados confiables.
- El Equipo está en operación y puesta en marcha con pruebas de tramos más cortos al del Slim Tube original, esto para ver su comportamiento y de esta manera ir aumentando la longitud e ir afinando el procedimiento de operación

6 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (01 de 09 de 2017). Obtenido de Diccionario de la real academica española Web site: <http://dle.rae.es/srv/search?m=30&w=metalograf%C3%ADa>
- Acerosmapa Corporation. (10 de 10 de 2017). Obtenido de Acerosmapa Web site: <http://www.acerosmapa.com.co/index.php/productos/laminas>
- CAP. (02 de 07 de 2017). Obtenido de Infoacero Web site: http://www.infoacero.cl/acero/que_es.htm
- Castro Garcia, R. (2011). *Análisis de un proceso de inyección de geles de dispersión coloidal (CDG) usando ensayos de laboratorio y simulación numérica*. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander.
- Chavez Bonilla, V. (2012). *Estimación de la presión mínima de miscibilidad (PMM) mediante la teoría del gradiente*. Mexico DF.
- Colmenares Vargas, K. M. (2019). *GTN-I-016 Instructivo para la operación de bombas de desplazamiento positivo*. Piedecuesta.
- Comtitronic. (s.f.). *Hornos Universales para Laboratorio-Linea Thermolab*. Itagui.
- Concha, P., Guerra, O., Huanaco, Y., Lazo, C., & Ccahua, Q. (10 de 07 de 2016). Obtenido de <http://mt2009gp3.blogspot.com.co/2009/08/metalografia.html>
- Guzmán, F. (2013). *Análisis de aceros por microscopía óptica*. Mexico D.F.: Instituto Politécnico Nacional.
- Laboratorio de Ensayo de Materiales Web site. (19 de 10 de 2017). *Google site*. Obtenido de <https://sites.google.com/site/laboratorioensmateriales/probetas--ataques>
- Maya Toro, G. A. (2018). *Evaluación y selección experimental de polímeros, que mejor se adapten a las condiciones de los campos de la VRS (Dina K)*.

Información experimental de desempeño en medio poroso para refinamiento del modelo de simulación. Piedecuesta.

Ornelas, F. G. (2013). *Análisis de Aceros por Microscopía Óptica*. Mexico D. F., Mexico D. F.

PACE, T. (01 de 09 de 2017). Obtenido de metallographic Web site:
<http://www.metallographic.com/Lab%20Equip/Manual%20Polishers.htm>

Schlumberger. (2019). *Oilfield Glossary*. Obtenido de
https://www.glossary.oilfield.slb.com/en/Terms/s/slim-tube_test.aspx

Smar. (2010). *Manual de Instrucción, Operación y Mantenimiento Transmisor Inteligente de Presión LD301*.

Struers Corporation. (10 de 10 de 2017). Obtenido de Struers Web site:
<http://www.struers.com/es-ES/Knowledge/Grinding-and-polishing#grinding-polishing-about>

Universidad Nacional de la Plata. (09 de 06 de 2017). *Universidad Nacional de la Plata Web site*. Obtenido de
http://www.ing.unlp.edu.ar/catedras/M0601/descargar.php?secc=0&id=M0601&id_inc=26818.

Velandia Suescún, T. P. (2010). *Predicción de un proceso de inyección de CO₂ miscible en yacimientos complejos para un sector del área Lisama*. Bucaramanga.

VERTEX Technics. (s.f.). *Teledyne ISCO pumps*. Obtenido de
<https://www.vertex.es/analitica/sistemas-de-flujo-continuo-doble-bomba/>

7 ANEXOS

7.1 ANEXO A: METODOLOGÍA PARA EMPAQUETADO Y DESEMPAQUETADO DE TUBING

7.1.1 Empaquetado de tubings para el montaje del Slim Tube.

7.1.1.1 Procedimiento manual

El empaquetamiento de tubing para el montaje de la prueba Slim tube requiere de una serie de pasos específicos y se puede implementar mediante dos metodologías distintas:

1 Metodología de empaquetado a cada centímetro del tubing:

- a) Recortar la malla de filtración (320 micras) con forma y dimensiones correspondientes al diámetro exterior del tubing (uno para cada extremo del tubing).



Figura 47. Corte de malla de filtración

- b) Ubicar la malla en uno de los bordes exteriores del tubing.



Figura 48. Postura de malla de filtración en tubing

- c) Fijar la unión reductora Swagelok de Acero inox. 1/2 pulg. SS-810-6-4 en uno de los extremos del tubing (Revisar previamente que la unión este limpia de finos e impurezas).



Figura 49. Postura de unión reductora en tubing

- d) Iniciar el llenado del tubing, agregando 1 cm de la arena seleccionada a empaquetar.



Figura 50. Tipos de arena y disposición del llenado de tubing

- e) Iniciar el compactado del tubing con la varilla compactadora y golpear con el mazo de goma para mayor compactación (con la varilla compactadora, ir verificando cada centímetro de empaquetamiento).



Figura 51. Compactado de tubing

- f) Repetir el paso (e) hasta llenar la mitad del volumen del tubing, montar en la zaranda durante 30 minutos, para reacomodar la arena de forma homogénea y posteriormente continuar el llenado hasta conseguir compactar el tramo restante del tubing a empaquetar.



Figura 52. Llenado total del tubing a cada centímetro.

ELABORADO POR:
Oficina de Investigaciones

REVISADO POR:
soporte al sistema integrado de gestión

APROBADO POR : Asesor de planeación
FECHA APROBACION:

- g) Repetir los pasos (b) y (c) en el otro extremo del tubing.
- h) Comprobar que no se estén escapando finos de los dos extremos del tubing con unos pequeños golpes sobre una superficie plana, con una lanilla blanca que absorba el impacto (para no maltratar el acople) y que además permita evidenciar posibles fugas (en cuyo caso se debe reacomodar la malla o adherirla al extremo del tubing con pegamento instantáneo).

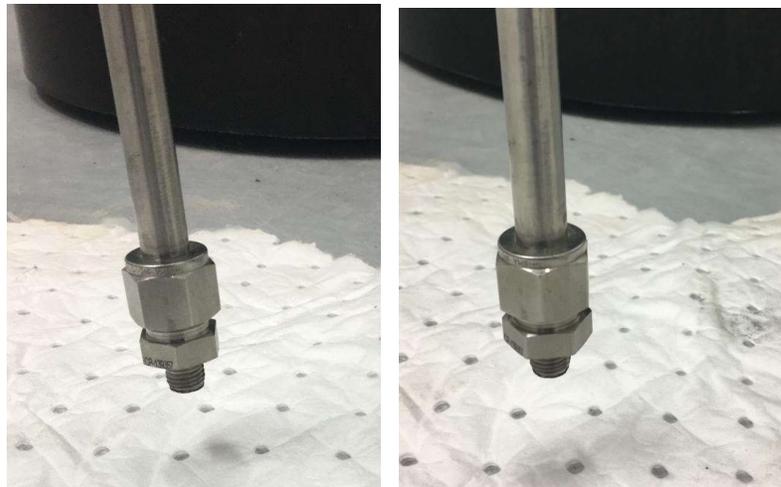


Figura 53. Comprobación de correcto sellado de tubing

2 Metodología de empaquetado a cada tercio del tubing:

Para esta metodología de empaquetados se aplican los mismos pasos (a), (b) y (c) de la metodología de empaquetado a cada centímetro del tubing.

- d) Iniciar el llenado del tubing, vertiendo aproximadamente 1/3 de la longitud de esté con arena seleccionada a empaquetar (ver figura 4).
- e) Montar el tubing en la zaranda durante 30 minutos, para reacomodar la arena de forma homogénea.



Figura 54. Montaje del tubing en la zaranda

- f) Compactar el tramo del tubing previamente zarandeado, con la varilla compactadora y golpear con el mazo de goma para mayor compactación (con la varilla compactadora, ir verificando cada tercio de empaquetamiento, ver figura 5).
- g) Repetir los pasos (e) y (f) dos veces más por los tercios restantes, hasta llenar por completo el tramo de tubing a empaquetar.
- h) Aplicar los mismos pasos (g) y (h) de la metodología de empaquetado a cada centímetro del tubing.

7.1.1.2 Procedimiento con maquina compactadora

La máquina consta de un cilindro neumático de doble efecto, una base de posicionamiento del tubing y un tablero de control con las operaciones de subir, bajar y compactar. El principio de operación de la herramienta de compactación es

intuitivo y de fácil manejo, sin embargo, se debe tener claro una serie de instrucciones y cuidados para empezar a utilizarla.

Cuidados:

- Contar con todos los elementos de seguridad para realizar la operación.
- Contar con herramientas y elementos necesarios para el montaje.
- Asegurar las mangueras de suministro de aire comprimido (racor) y verificar posibles fugas.
- Verificar el correcto funcionamiento de los comandos de control subir, bajar y compactar.

Instrucciones:

- a) Realizar la mezcla de arena Ottawa según los porcentajes obtenidos de la ecuación de regresión con el fin de conseguir la permeabilidad del campo en estudio.
- b) Posicionar el tubing en la maquina con una malla en la parte inferior de menor rango al mesh de las arenas utilizadas, de esta manera garantizar la compactación y la optimización del recurso (Ver figura 1)
- c) Se utiliza la máquina de compactación ingresando la mezcla de arenas Ottawa al tubing a partir de la siguiente manera.
- d) Se adiciona 10mL de mezcla de arena Ottawa
- e) Accionar 3 choques consecutivos con la superficie de la arena al interior de tubing.
- f) Ejecutar la acción compactar durante 10sg.

- g) Aplicar dos veces más los pasos (e) y (f)
- h) Adicionar 5mL y aplicar los pasos (e), (f) y (g). Seguir esta secuencia hasta empaquetar el tubing en su totalidad.
- i) Una vez los tubing hayan sido empaquetados se procederá a ensamblar la configuración a ensayar empaquetando de forma manual los accesorios que lo componen (codos y tees).

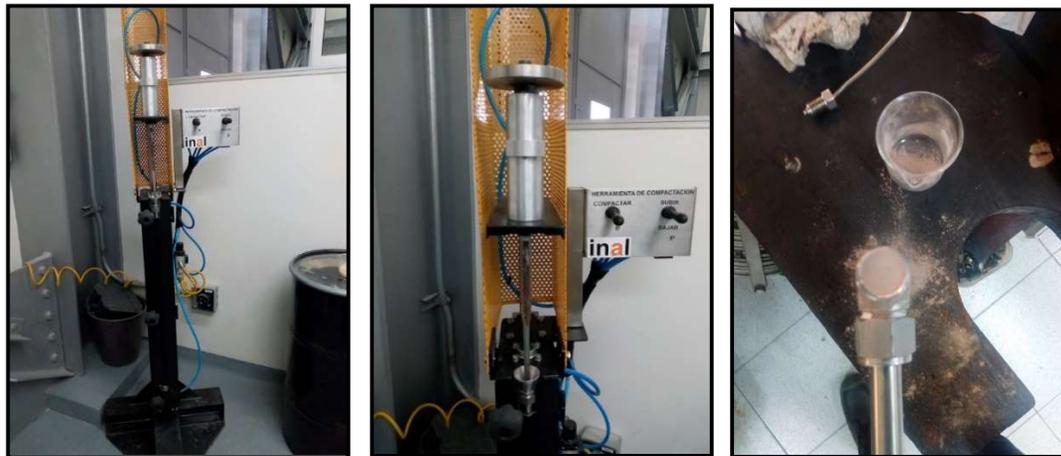


Figura 55. Máquina compactadora

7.1.2 Limpieza o desempaquetamiento de tubing

En este trabajo de limpieza o desempaquetamiento de tubing para el desensamblado de la prueba Slim tube se requiere de una serie de pasos específicos:

- a) Secar el tubing a desempaquetar, en el horno DiEs a 90°C durante 48 horas aproximadamente.



Figura 56. Secado de arena del tubing en horno DiEs

b) Retirar los dos acoples y mallas de filtración de los extremos del tubing.



Figura 57. Montaje del tubing en la zaranda

c) Raspar la superficie de la arena de uno de los extremos del tubing con ayuda de un alambre e ir retirando el material que se desprende en un recipiente.



Figura 58. Raspado de arena en el extremo del tubing

- d) Montar el tubing en la zaranda durante 10 minutos, con el extremo previamente raspado hacia la parte inferior y con un recipiente debajo, para que se empiece a desempaquetar el contenido.



Figura 59. Montaje del tubing en la zaranda para desempaqueado

- e) Golpear el tubing suavemente sobre una superficie plana, con una lanilla blanca que absorba el impacto (para no maltratar el extremo del tubo) y que además permita evidenciar el material que se desprende de este.



Figura 60. Desempaquetamiento sobre superficie plana

- f) Repetir los pasos (c), (d) y (e) hasta que se desempaquete el tubing completamente.
- g) Sopletear el interior del tubing y los acoples, lavar, secar y sopletear nuevamente para posteriores usos.



Figura 61. Limpieza del desempaquetado

7.2 ANEXO B: ESPECIFICACIONES DE INSUMOS

Figura 62. Especificaciones Horno



Modelo	TH53	TH115	TH240	TH480	TH720	TH1000
Capacidad (lts)	53	115	240	480	720	1000
Dimensiones interiores (mm)						
Ancho (a)	400	600	1000 (h) 480 (v)	700	1000	1400
Alto (h)	400	480	600 (h) 1000 (v)	1200	1200	1200
Profundidad (p)	345	400	400 (h) 500(v)	640	640	640
Dimensiones exteriores (mm)						
Ancho (a)	765	965	1400(h) 830(v)	1040	1340	1740
Alto (h)	676	755	1090(h) 1470(v)	1800	1800	1800
Profundidad (p)	609	664	800(h) 840(v)	960	960	960
Número de bandejas incluidas	2	2	2(h) 3(v)	3	4	8
Capacidad máxima de bandejas	6	6	8	11	12	24
Montaje	Mesón					
	x	x	X			
	Al piso sobre ruedas					
			x	x	x	x
Número de puertas exteriores	1	1	1	1	1	2
Sensor de temperatura pt100: cantidad por equipo	1	1	1	4	4	4
Voltaje a.c. (2 fases y tierra) / 60 Hz	110	110	110	220	220	220
Rango de temperatura	+10°C ~ 200°C					
Homogeneidad espacial	+/- 1°C (TH) +/- 2°C (THN)					
Estabilidad temporal	+/- 0.5°C					
Desviación límite del set-point	+/- 1.5K entre 70 y 180 °C					
Control						
			<ul style="list-style-type: none"> • Control Electrónico micro procesado • Indicación digital en pantalla. • Menú de configuración y calibración por pantalla de fácil acceso al usuario protegida por password • Algoritmo de control tipo P.I.D. con salida PWM. • Resolución del control: +/- 1% del set point. • Resolución de la medida +/- 0,1 °C • Elemento de salida: Relé de estado sólido con cruce por cero. 			



Calle 76 No. 55 – 70 PBX. (57) (4) 4441848
Itagui, Antioquia, Colombia
ventas@di.es.com.co / www.di.es.com.co

Fuente: Comitronic

ELABORADO POR:
Oficina de Investigaciones

REVISADO POR:
soporte al sistema integrado de gestión

APROBADO POR : Asesor de planeación
FECHA APROBACION:

Figura 63. Especificaciones tubería PVC

Accesorios PVC SCH 40	Presión Mínima de Rotura 90 segundos	
	Mpa	psi
1/2	13.17	1910
3/4	10.62	1540
1	9.93	1440
1.1/4	8.14	1180
1.1/2	7.31	1060
2	6.14	890
2.1/2	6.69	870
3	5.79	840
4	4.90	710
6	3.86	560

Temperatura °C (°F)	Factor para multiplicar presión Trabajo 23°C
27 (80)	0.88
32 (90)	0.75
38 (100)	0.62
43 (110)	0.50
49 (120)	0.40
54 (130)	0.30
60 (140)	0.22

Fuente: PAVCO

Figura 64. Especificaciones tubería de acero inoxidable

Ø ext. del tubo pulg.	Pared del tubo pulg.	Referencia	Peso lb/pie	Presión de servicio psig
1/8	0,028	SS-T2-S-028-20	0,029	8 500
1/4	0,035	SS-T4-S-035-20	0,080	5 100
	0,049	SS-T4-S-049-20	0,105	7 500
	0,065	SS-T4-S-065-20	0,128	10 200
3/8	0,035	SS-T6-S-035-20	0,127	3 300
	0,049	SS-T6-S-049-20	0,171	4 800
	0,065	SS-T6-S-065-20	0,215	6 500
1/2	0,035 ^①	SS-T8-S-035-20	0,174	2 600
	0,049	SS-T8-S-049-20	0,236	3 700
	0,065	SS-T8-S-065-20	0,302	5 100
5/8	0,065	SS-T10-S-065-20	0,389	4 000
3/4	0,065	SS-T12-S-065-20	0,476	3 300
1	0,083	SS-T16-S-083-20	0,813	3 100
1 1/4	0,095 ^①	SS-T20-S-095-20	1,187	2 800
	0,120	SS-T20-S-120-20	1,473	3 600
1 1/2	0,120 ^①	SS-T24-S-120-20	1,792	3 000
	0,134	SS-T24-S-134-20	1,981	3 400
2	0,134 ^①	SS-T32-S-134-20	2,705	2 500
	0,188	SS-T32-S-188-20	3,686	3 600

Temperatura		Material	
°F	°C	304, 304 / 304L	316, 316 / 316L
200	93	1,00	1,00
400	204	0,93	0,96
600	315	0,82	0,85
800	426	0,76	0,79
1000	537	0,69	0,76

Fuente: Swalegok

ELABORADO POR:
Oficina de Investigaciones

REVISADO POR:
soporte al sistema integrado de gestión

APROBADO POR : Asesor de planeación
FECHA APROBACION:

Figura 65. Especificaciones accesorios Swagelok

Swagelok
10/1/2019 5:14:56 PM
www.swagelok.com

Tubo de instrumentación sin soldadura de 304/304L y 316/316L



Referencia
SS-T4-S-049-20

Descripción del producto
Tubo sin soldadura de Acero inox. 316/316L, 1/4 pulg. OD x 0.049 pulg. de pared x 20 Pies (Precio y pedido por pie; los pedidos son en múltiplos de 20 pies)

Especificaciones

General	
eClass (6.0)	37029000
Material del cuerpo	Acero Inoxidable
Tube OD	1/4 pulg.
Tube Wall Thickness	0.049 pulg.

Swagelok
10/1/2019 5:18:27 PM
www.swagelok.com

Tubo de instrumentación sin soldadura de 304/304L y 316/316L



Referencia
SS-T8-S-049-20

Descripción del producto
Tubo sin soldadura de Acero inox. 316/316L, 1/2 pulg. OD x 0.049 pulg. de pared x 20 Pies (Precio y pedido por pie; los pedidos son en múltiplos de 20 pies)

Especificaciones

General	
eClass (6.0)	37029000
Material del cuerpo	Acero Inoxidable
Tube OD	1/2 pulg.
Tube Wall Thickness	0.049 pulg.

ELABORADO POR:
Oficina de Investigaciones

REVISADO POR:
soporte al sistema integrado de gestión

APROBADO POR : Asesor de planeación
FECHA APROBACION:


10/1/2019 2:45:29 PM
www.swagelok.com

Válvulas antirretorno



Referencia
SS-CHS8-1

Descripción del producto
Válvula antirretorno de acero inox. hasta 413 bar (6000 psig). 1/2 pulg. Swagelok, 1 psig (0.07 bar)

Especificaciones

General	
Característica	Juntas tóricas: FKM fluorocarbono
eClass (4.1)	37010801
eClass (5.1.4)	27300400
eClass (6.0)	27300601
eClass (6.1)	27300601
Lubricante	Christo-lube MCG 111 (WL8)
Material de la válvula	Acero inoxidable 316
Material del anillo soporte	PTFE
Material del cierre	FKM fluorocarbono
Material del cuerpo	Acero Inoxidable 316
Presión de disparo	1 psi (0.07 bar, 0.007 MPa)

ELABORADO POR:
 Oficina de Investigaciones

REVISADO POR:
 soporte al sistema integrado de gestión

APROBADO POR : Asesor de planeación
 FECHA APROBACION:

Swagelok
10/1/2019 2:54:10 PM
www.swagelok.com

Series 83 y H83, Trunnion



Referencia
SS-H83PS8

Descripción del producto
Válvula de bola de 3 piezas de Alta presión, 6700 psig (461 bar) de Acero inox., Asientos de PEEK. 1/2 pulg. Swagelok

Especificaciones

General	
Característica	Asiento de PEEK
Clase de servicio	Servicio de alta presión
Color del mando	Negro
eClass (4.1)	37010401
eClass (5.1.4)	37010401
eClass (6.0)	37010401
eClass (6.1)	37010401
Junta tórica	FKM fluorocarbono
Lubricante	Perf. Polyether/Tung. Disulfuro/Disulfuro de molibdeno
Material de la válvula	Acero inoxidable
Material del asiento	PEEK
Material del cuerpo	Acero Inoxidable 316
Modelo de caudal	2 vías, Cierre, Recta
Orificio	4,7 mm / 0,187 pulg.

ELABORADO POR:
Oficina de Investigaciones

REVISADO POR:
soporte al sistema integrado de gestión

APROBADO POR : Asesor de planeación
FECHA APROBACION:


10/1/2019 3:02:42 PM
www.swagelok.com

Codos de 90°



Referencia
SS-810-9

Descripción del producto
Unión codo Swagelok de Acero inox., 1/2 pulg. OD Tubo

Especificaciones

General	
Body Type	Unión codo
eClass (4.1)	37020715
eClass (5.1.4)	37020501
eClass (6.0)	37020501
eClass (6.1)	37020501
Material del cuerpo	Acero Inoxidable 316
Proceso de limpieza	Limpieza y embalaje estándar (SC-10)
Serie	Racores para tubo y adaptadores Swagelok
Tamaño de conexión 1	1/2 pulg
Tamaño de conexión 2	1/2 pulg

ELABORADO POR:
 Oficina de Investigaciones

REVISADO POR:
 soporte al sistema integrado de gestión

APROBADO POR : Asesor de planeación
 FECHA APROBACION:


10/1/2019 3:03:05 PM
www.swagelok.com

Accesorios rectos



Referencia
SS-810-6-4

Descripción del producto
Unión reductora Swagelok de Acero inox., 1/2 pulg. x 1/4 pulg. OD Tubo

Especificaciones

General	
Body Type	Unión / Unión reductora
eClass (4.1)	37070710
eClass (5.1.4)	37020590
eClass (6.0)	37020514
eClass (6.1)	37020590
Material del cuerpo	Acero Inoxidable 316
Pasamuros	No pasamuros
Proceso de limpieza	Limpieza y embalaje estándar (SC-10)
Serie	Racores para tubo y adaptadores Swagelok
Tamaño de conexión 1	1/2 pulg
Tamaño de conexión 2	1/4 pulg.

ELABORADO POR:
Oficina de Investigaciones

REVISADO POR:
soporte al sistema integrado de gestión

APROBADO POR : Asesor de planeación
FECHA APROBACION:


10/1/2019 3:01:06 PM
www.swagelok.com

Unión Cruces



Referencia
SS-810-4

Descripción del producto
Cruz Swagelok de Acero inox.. 1/2 pulg. OD Tubo

Especificaciones

General	
Body Type	Cruz
eClass (4.1)	37020717
eClass (5.1.4)	37020590
eClass (6.0)	37200107
eClass (6.1)	37020590
Material del cuerpo	Acero Inoxidable 316
Proceso de limpieza	Limpieza y embalaje estándar (SC-10)
Serie	Racores para tubo y adaptadores Swagelok
Tamaño de conexión 1	1/2 pulg
Tamaño de conexión 2	1/2 pulg
Tamaño de conexión 3	1/2 pulg
Tamaño de conexión 4	1/2 pulg.

ELABORADO POR:
Oficina de Investigaciones

REVISADO POR:
soporte al sistema integrado de gestión

APROBADO POR : Asesor de planeación
FECHA APROBACION:

Swagelok
10/1/2019 3:02:24 PM
www.swagelok.com

Tes



Referencia
SS-810-3

Descripción del producto
Unión te Swagelok de Acero inox., 1/2 pulg. OD Tubo

Especificaciones

General	
Body Type	Te
eClass (4.1)	37020716
eClass (5.1.4)	37020506
eClass (6.0)	37020506
eClass (6.1)	37020506
Material del cuerpo	Acero Inoxidable 316
Proceso de limpieza	Limpieza y embalaje estándar (SC-10)
Serie	Racores para tubo y adaptadores Swagelok
Tamaño de conexión 1	1/2 pulg
Tamaño de conexión 2	1/2 pulg
Tamaño de conexión 3	1/2 pulg

ELABORADO POR:
Oficina de Investigaciones

REVISADO POR:
soporte al sistema integrado de gestión

APROBADO POR : Asesor de planeación
FECHA APROBACION:


10/1/2019 3:01:39 PM
www.swagelok.com

Unión Cruces



Referencia
SS-400-4

Descripción del producto
Cruz Swagelok de Acero inox., 1/4 pulg. OD Tubo

Especificaciones

General	
Body Type	Cruz
eClass (4.1)	37020717
eClass (5.1.4)	37020590
eClass (6.0)	37200107
eClass (6.1)	37020590
Material del cuerpo	Acero Inoxidable 316
Proceso de limpieza	Limpieza y embalaje estándar (SC-10)
Serie	Racores para tubo y adaptadores Swagelok
Tamaño de conexión 1	1/4 pulg.
Tamaño de conexión 2	1/4 pulg.
Tamaño de conexión 3	1/4 pulg.
Tamaño de conexión 4	1/4 pulg.

ELABORADO POR:
 Oficina de Investigaciones

REVISADO POR:
 soporte al sistema integrado de gestión

APROBADO POR : Asesor de planeación
 FECHA APROBACION:


10/1/2019 3:00:27 PM
www.swagelok.com

Tes



Referencia
SS-400-3

Descripción del producto
Unión te Swagelok de Acero inox., 1/4 pulg. OD Tubo

Especificaciones

General	
Body Type	Te
eClass (4.1)	37020716
eClass (5.1.4)	37020506
eClass (6.0)	37020506
eClass (6.1)	37020506
Material del cuerpo	Acero Inoxidable 316
Proceso de limpieza	Limpieza y embalaje estándar (SC-10)
Serie	Racores para tubo y adaptadores Swagelok
Tamaño de conexión 1	1/4 pulg.
Tamaño de conexión 2	1/4 pulg.
Tamaño de conexión 3	1/4 pulg.

ELABORADO POR:
 Oficina de Investigaciones

REVISADO POR:
 soporte al sistema integrado de gestión

APROBADO POR : Asesor de planeación
 FECHA APROBACION:


10/1/2019 3:02:01 PM
www.swagelok.com

Accesorios rectos



Referencia
SS-400-1-4

Descripción del producto
Conector macho Swagelok de Acero inox., 1/4 pulg. OD Tubo x 1/4 pulg. NPT macho

Especificaciones

General	
Body Type	Conector macho
eClass (4.1)	37030703
eClass (5.1.4)	37020590
eClass (6.0)	37020590
eClass (6.1)	37020590
Material del cuerpo	Acero Inoxidable 316
Pasamuros	No pasamuros
Proceso de limpieza	Limpieza y embalaje estándar (SC-10)
Serie	Racores para tubo y adaptadores Swagelok
Tamaño de conexión 1	1/4 pulg.
Tamaño de conexión 2	1/4 pulg.

Fuente: Swagelok

ELABORADO POR:
Oficina de Investigaciones

REVISADO POR:
soporte al sistema integrado de gestión

APROBADO POR : Asesor de planeación
FECHA APROBACION:

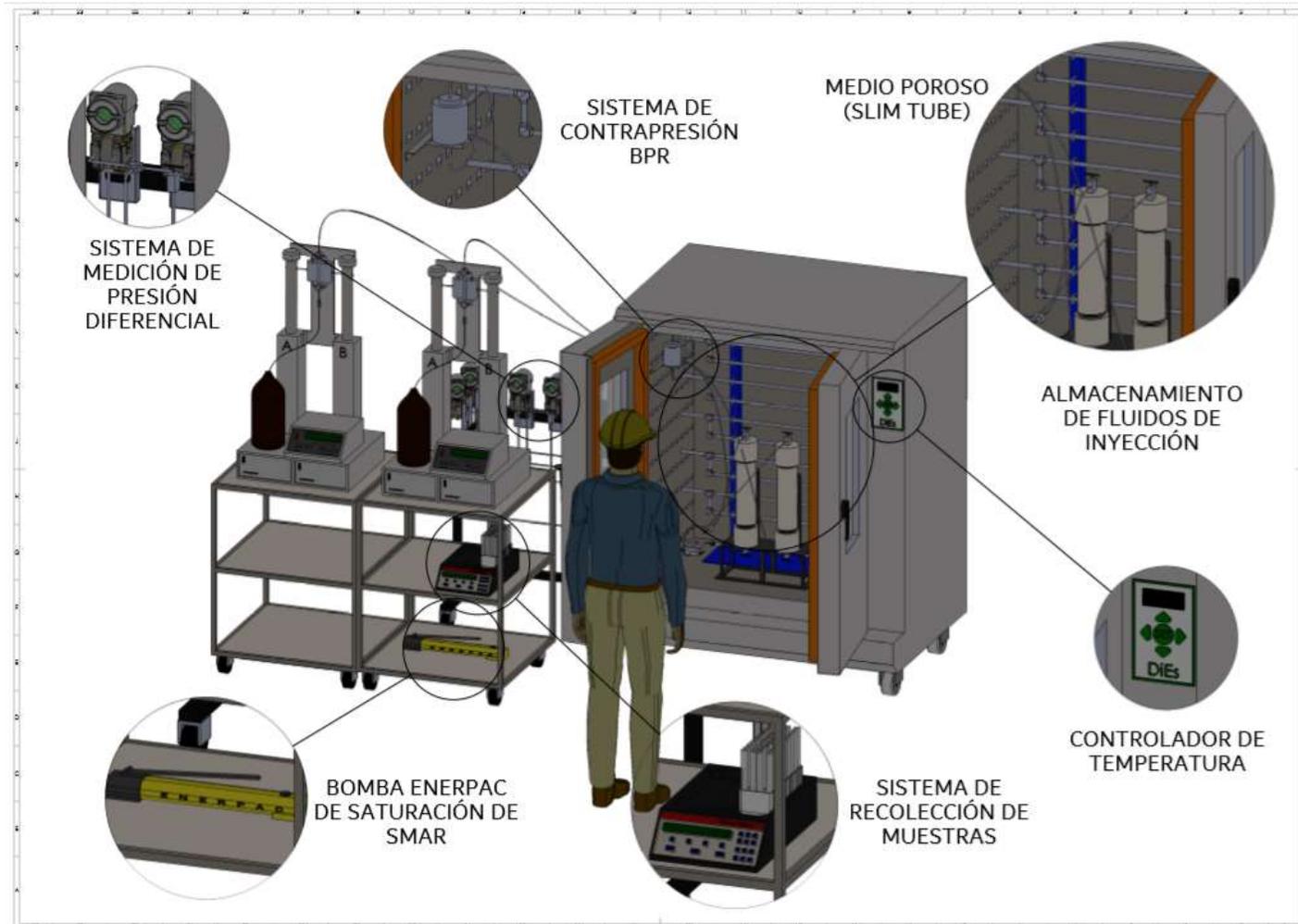
7.3 ANEXO C: PLANOS SLIM TUBE MONTAJE PRUEBA CDG

Este anexo está dedicado al montaje de la prueba de co-inyección de CDG que se lleva a cabo en el laboratorio de Recobro Mejorado en el Centro de Innovación y Tecnología ICP. Como primera intención es dejar reflejado los instrumentos, equipos y conexiones necesarias para iniciar una prueba de este tipo, y como segundo propósito alojar este material en los archivos de interés del laboratorio del equipo Slim Tube para actividades de capacitación de personal que desea ejecutar este tipo de pruebas. El montaje consta de los siguientes instrumentos:

- ✓ Almacenamiento de fluidos de inyección
- ✓ Medio poroso (Slim Tube)
- ✓ Controlador de temperatura
- ✓ Sistema de contrapresión BPR
- ✓ Sistemas de medición de presión diferencial
- ✓ Bomba ENERPAC de saturación de SMAR
- ✓ Sistema de recolección de muestras
- ✓ Suministro de fluido desplazante
- ✓ Recolector de efluente (Producción)
- ✓ Configuración toma de muestras
- ✓ Transmisor de presión
- ✓ Suministro de nitrógeno
- ✓ Pictogramas de seguridad

En los planos siguientes se puede observar el montaje más claro y las partes mencionadas mediante un diseño CAD (Computer Assistant Design) elaborado en el software de modelado en tres dimensiones SolidWorks.

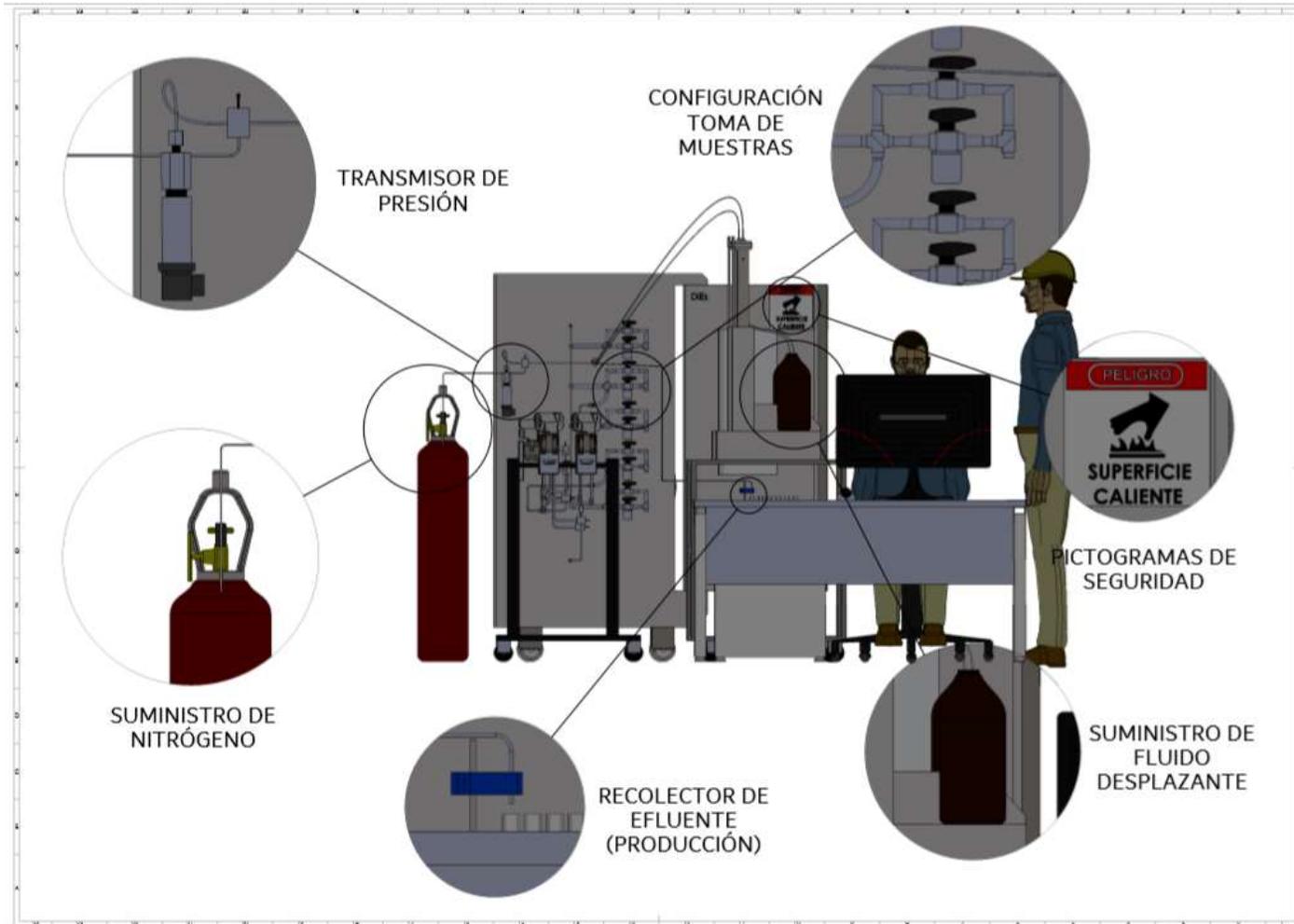
NOTA: Se dejará a disposición del laboratorio un video mostrando por partes cada instrumento mencionado y la ubicación de las conexiones de tubing que se deben realizar para ejecutar pruebas de co-inyección de CDG.



ELABORADO POR:
Oficina de Investigaciones

REVISADO POR:
soporte al sistema integrado de gestión

APROBADO POR : Asesor de planeación
FECHA APROBACION:

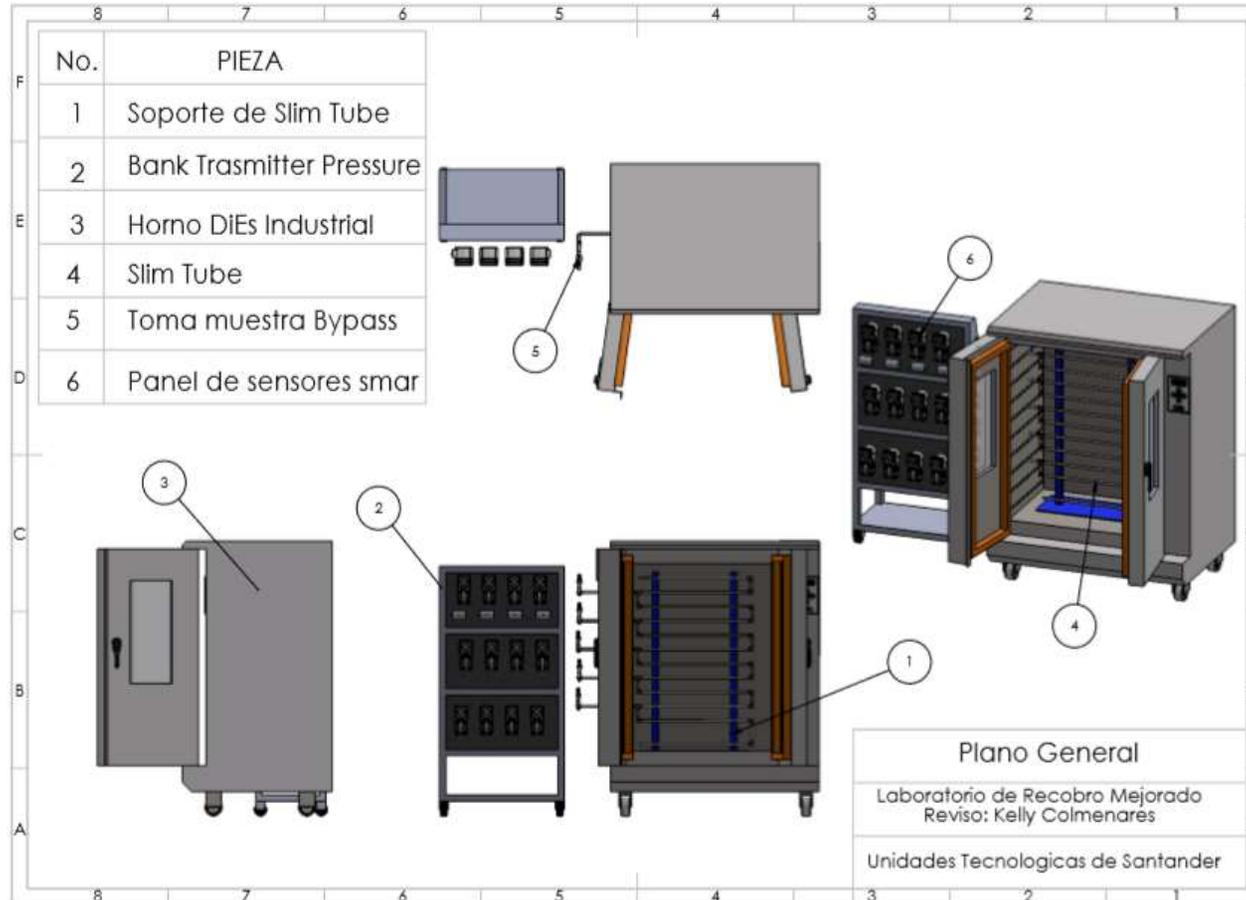


ELABORADO POR:
Oficina de Investigaciones

REVISADO POR:
soporte al sistema integrado de gestión

APROBADO POR : Asesor de planeación
FECHA APROBACION:

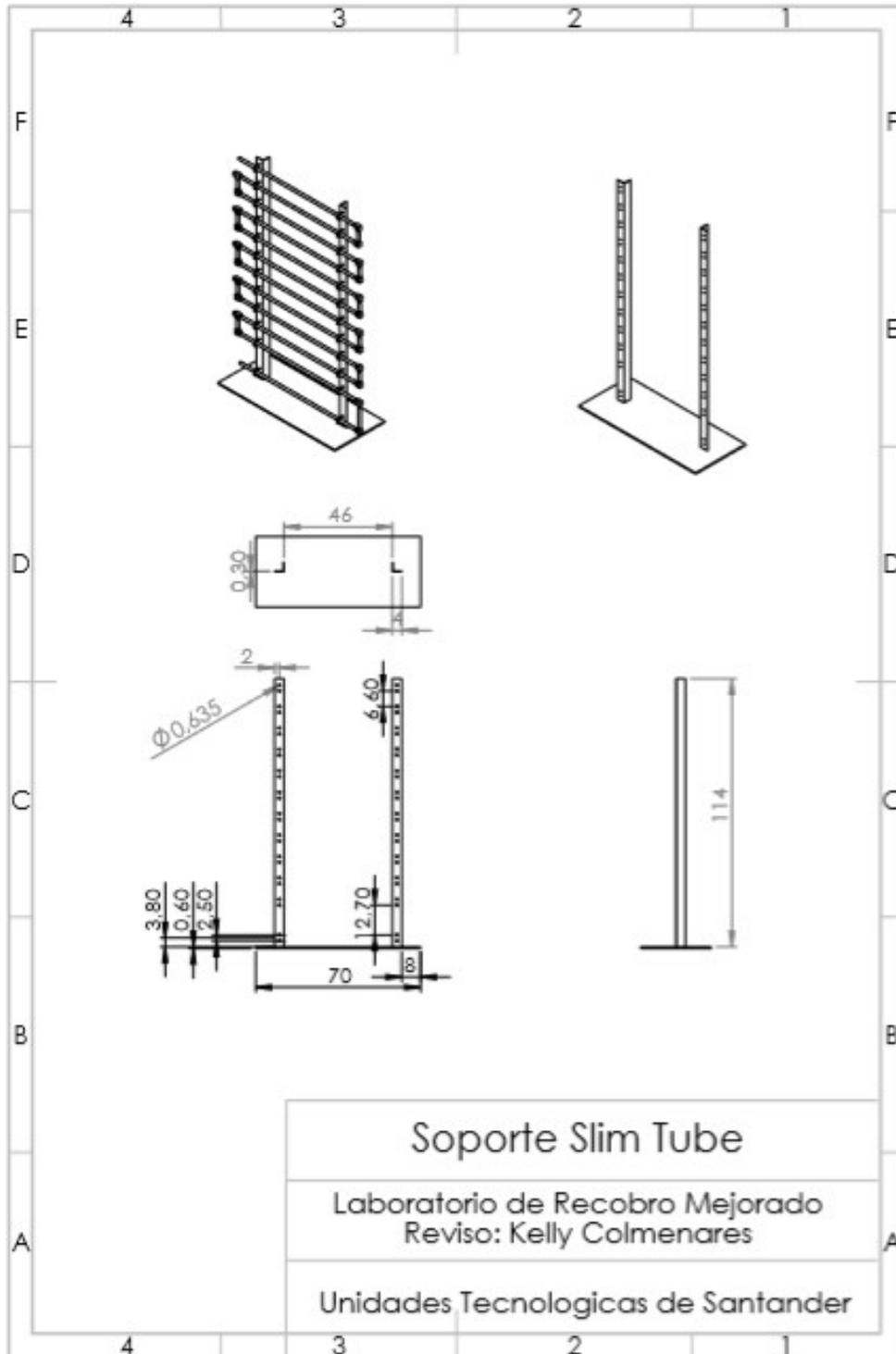
7.4 ANEXO D: AVANCE PLANOS SLIM TUBE VERSION 2020



ELABORADO POR:
 Oficina de Investigaciones

REVISADO POR:
 soporte al sistema integrado de gestión

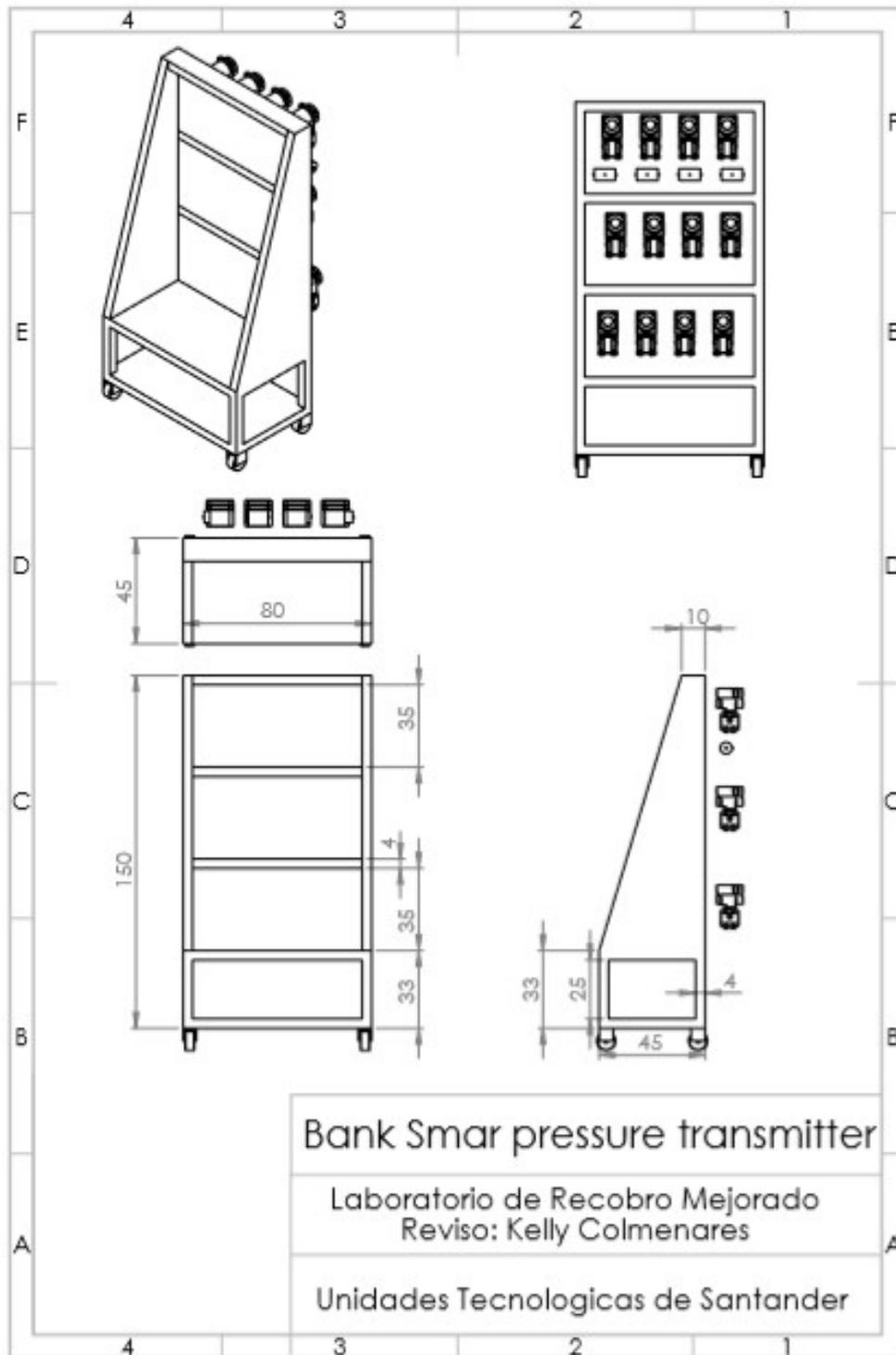
APROBADO POR : Asesor de planeación
 FECHA APROBACION:



ELABORADO POR:
Oficina de Investigaciones

REVISADO POR:
soporte al sistema integrado de gestión

APROBADO POR : Asesor de planeación
FECHA APROBACION:



ELABORADO POR:
Oficina de Investigaciones

REVISADO POR:
soporte al sistema integrado de gestión

APROBADO POR : Asesor de planeación
FECHA APROBACION:

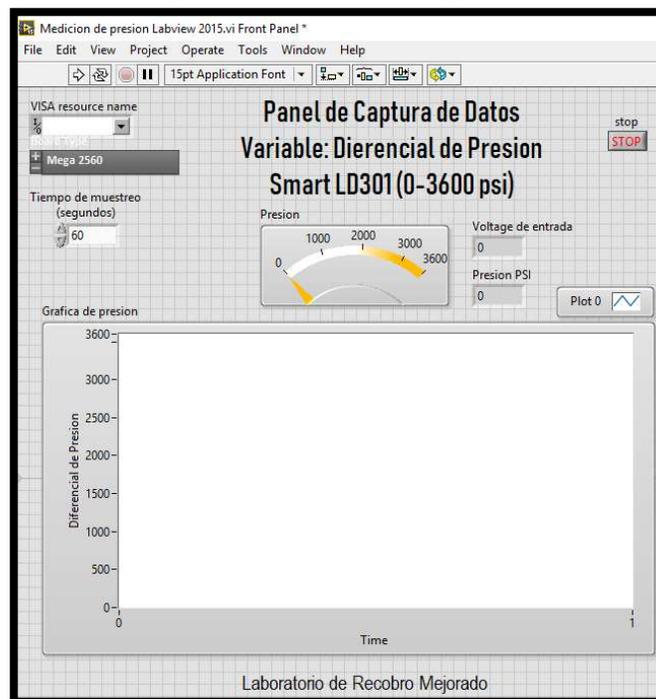
7.5 ANEXO E: MEJORAS PROPUESTAS

Se plantea una idea de captura de datos temporal hasta que se disponga del software especializado para ello, que es Opto 22, viendo la necesidad dentro del laboratorio y los especialistas con el afán de dar avances en pruebas con secciones de tubing más cortas y mirar su comportamiento. En estas pruebas inicialmente recolectaban los datos de forma manual y con un intervalo de tiempo definido, es claro que con esta metodología se obtengan resultados imprecisos y con porcentajes de error altos.

Este sistema innovador propuesto, además de automatizar la lectura del sensor de presión diferencial optimiza el tiempo ya que este me crea un histórico de datos en un archivo compatible de Microsoft Excel, tiempo útil que se pierde en el registro y digitalización de los datos.

Se trata de una tarjeta Arduino vinculada con el software LabVIEW, la tarjeta nos hace el papel de controlador, el censa una salida de voltaje proveniente del transmisor de presión y el software nos facilita una plataforma programable el cual se le da un trato matemático.

Figura 66. Panel de Configuración



ELABORADO POR:
 Oficina de Investigaciones

REVISADO POR:
 soporte al sistema integrado de gestión

APROBADO POR : Asesor de planeación
 FECHA APROBACION:

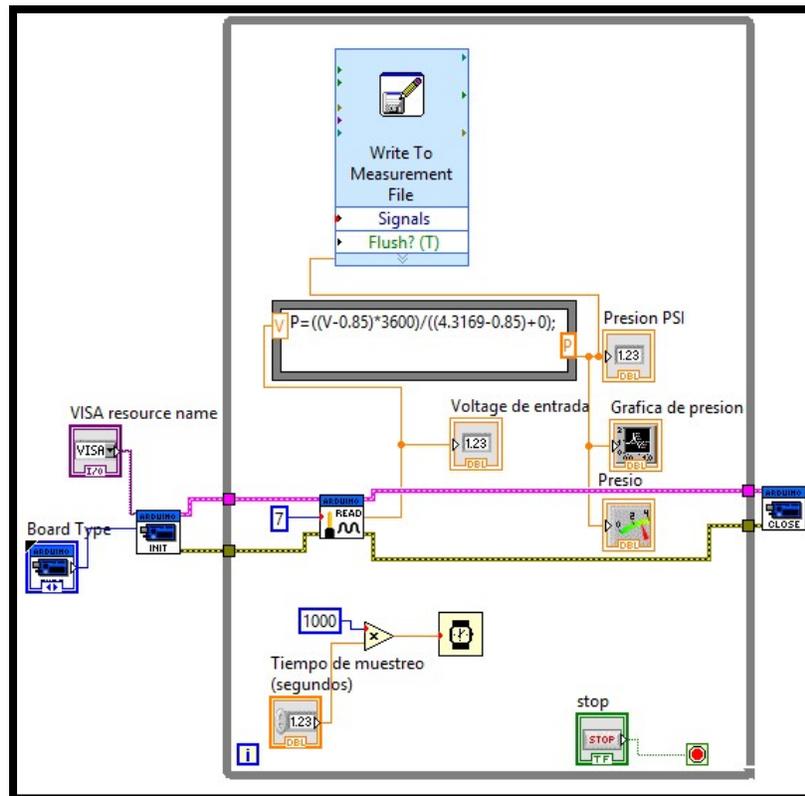
En la figura 13 se muestra el panel donde registra la presión actual al intervalo determinado registrándola en una gráfica (Diferencial de presión vs Tiempo), y en la Figura 14 la programación para la lectura, cálculo matemático, registro y guardado de los datos. El cálculo matemático se obtiene con la Tabla 8 y la siguiente ecuación:

$$P = \frac{(V_{med} - V_{min}) * (P_{max} - P_{min})}{(V_{max} - V_{min}) + P_{min}}$$

Tabla 9. Escalamiento de variables

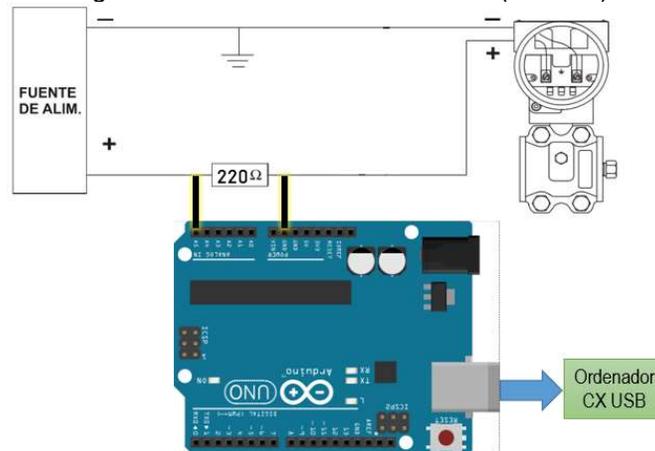
Variable	Rango mínimo	Rango máximo
Presión	0 psi	3600 psi
Corriente	4 mA	20 mA
Resistencia	220 ohmios	
Voltaje	0.88 V	4.4 V

Figura 67. Programación LabVIEW



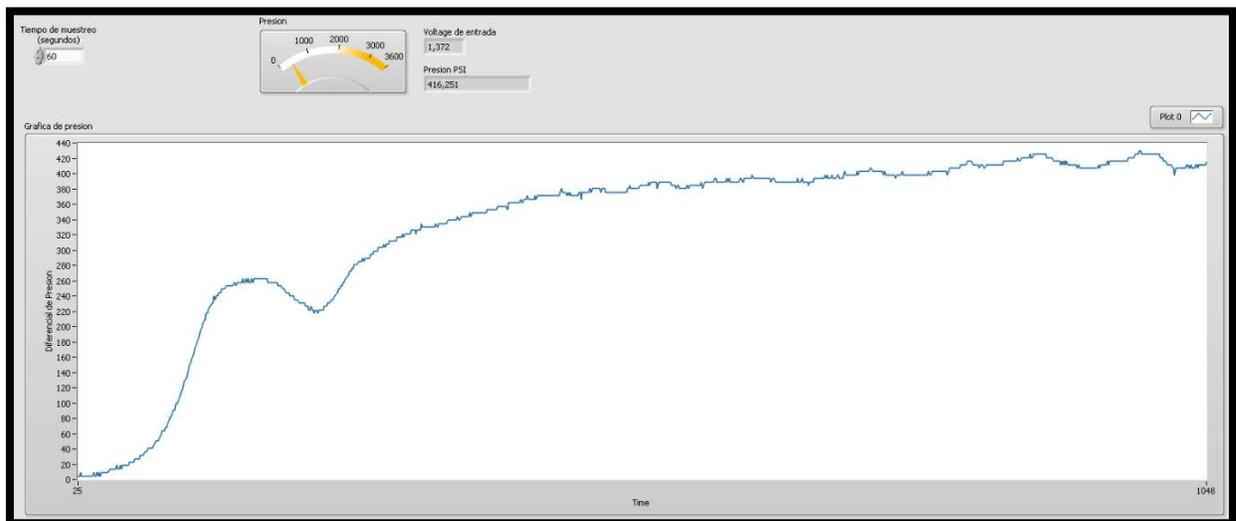
La conexión del controlador Arduino debe ir una conexión paralelo a la resistencia para medir su voltaje ya que el transmisor nos da una salida de corriente de 4mA-20mA proporcional dependiendo de la presión que este registre, En la Figura 15 se ve el montaje en físico, se debe conectar un terminal a tierra y el otro a la entrada analoga de la tarjeta.

Figura 68. Conexión del controlador (Arduino)



Finalmente, se calibra y se comprueba la sincronización del sensor y el programa, en la Figura 16 se capturaron datos por más de 16 horas continuas en una prueba de inyección de CDG en el Laboratorio de Recobro Mejorado.

Figura 69. Comportamiento DP



ELABORADO POR:
Oficina de Investigaciones

REVISADO POR:
soporte al sistema integrado de gestión

APROBADO POR : Asesor de planeación
FECHA APROBACION: