



Producto #55: Adaptación de medio poroso de mayor longitud, con pruebas de verificación

Proyecto de investigación

Juan Samuel Cortes Serrano  
CC 1098770332

UNIDADES TECNOLÓGICAS DE SANTANDER  
Facultad de ciencia naturales e ingenierías  
Ingeniería electromecánica  
Bucaramanga, 08 de agosto del 2022



Producto #55: Adaptación de medio poroso de mayor longitud, con pruebas de verificación

Proyecto de investigación

Juan Samuel Cortes Serrano  
CC 1098770332

**Trabajo de Grado para optar al título de**  
Ingeniero electromecánico

**DIRECTOR**

MSc. Javier Ascanio Villabona.

GRUPO DE INVESTIGACION EN SISTEMAS DE ENERGIA AUTOMATIZACION Y CONTROL  
(GISEAC)

**UNIDADES TECNOLÓGICAS DE SANTANDER**

Facultad de ciencia naturales e ingenierías  
Ingeniería electromecánica  
Bucaramanga, 08 de agosto del 2022

F-DC-125

INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO EN MODALIDAD DE PROYECTO  
DE INVESTIGACIÓN, DESARROLLO TECNOLÓGICO, MONOGRAFÍA,  
EMPRESARIADO Y SEMINARIO

VERSIÓN: 1.0

Nota de Aceptación

Aprobado

---

---

---

---

  
**JAVIER ASCANIO VILLABONA**  
PhD. Eficiencia Energética  
MSc. Eficiencia Energética y energías renovables  
Ing. Electromecánico

---

Firma del Evaluador

  
**JAVIER ASCANIO VILLABONA**  
PhD. Eficiencia Energética  
MSc. Eficiencia Energética y energías renovables  
Ing. Electromecánico

---

Firma del Director

## **DEDICATORIA**

Dedico este trabajo a mi familia, a las unidades tecnológicas de Santander y al instituto colombiano de petróleo ICP Ecopetrol .



## **AGRADECIMIENTOS**

Agradezco a Dios por las oportunidades de trabajar y aprender constantemente, agradezco a mi familia por su apoyo y amor; también agradezco al ingeniero Javier Ascanio por su amable y atenta colaboración y supervisión del proyecto, a la unidades tecnológicas de Santander por el conocimiento que aportó en mi desarrollo académico, al personal del laboratorio de recobro mejorado del ICP en especial a los ingenieros Darwin Marin, Alejandro Rios, Alberto Rueda y Jorge Roballo, por el apoyo durante el desarrollo del proyecto y por los conocimientos que compartieron conmigo, agradecer a la ingeniera Kelly Colmenares por su liderazgo en el laboratorio de recobro mejorado, por su disposición, gestión y colaboración en la culminación del proyecto del Slim tube.

## TABLA DE CONTENIDO

|   |           |
|---|-----------|
| <b>RESUMEN EJECUTIVO.....</b>   | <b>12</b> |
| <b>INTRODUCCIÓN.....</b>  | <b>13</b> |
| <b>1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....</b>   | <b>14</b> |
| 1.1. DESCRIPCIÓN DE LA PROBLEMÁTICA.....  | 14        |
| 1.2. JUSTIFICACIÓN DEL DESARROLLO.....  | 15        |
| 1.3. OBJETIVOS.....   | 16        |
| 1.3.1. OBJETIVO GENERAL.....  | 16        |
| 1.3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....   | 16        |
| <b>2. MARCO REFERENCIAL.....</b>  | <b>17</b> |
| 2.1. MARCO TEÓRICO.....   | 17        |
| 2.1.1. PETRÓLEO:.....   | 18        |
| 2.1.2. HIDROCARBURO.....  | 18        |
| 2.1.3. RECOBRO MEJORADO.....  | 19        |
| 2.1.4. VISCOSIDAD.....  | 19        |
| 2.1.5. COREFLOODING.....  | 19        |
| 2.1.6. MEDIO POROSO.....  | 19        |
| 2.1.7. DENSIDAD API.....  | 20        |
| 2.1.8. YACIMIENTO:.....   | 20        |
| 2.1.9. POROSIDAD:.....  | 20        |
| 2.1.10. PERMEABILIDAD.....  | 20        |
| 2.1.11. EQUIPO SLIM – TUBE.....   | 21        |
| 2.1.12. REGULADOR DE CONTRAPRESIÓN BPR.....   | 24        |
| 2.1.13. BOMBA DE AGUA D SERIES.....   | 25        |
| 2.1.14. VÁLVULAS AUTOMÁTICAS VINDUM CV.....   | 26        |
| 2.1.15. TRANSMISOR INTELIGENTE DE PRESIÓN SMAR LD301.....                           | 27        |
| 2.1.16. HORNO THERMOLAB TH720 – DIES.....   | 28        |
| <b>3. DISEÑO DE LA INVESTIGACION.....</b>   | <b>29</b> |
| <b>4. DESARROLLO DEL TRABAJO DE GRADO.....</b>                                      | <b>30</b> |
| 4.1.1. ETAPA 1 DISEÑO DEL EQUIPO DE MEDIO POROSO DE MAYOR LONGITUD.....             | 30        |
| 4.1.2. EQUIPOS Y COMPONENTES ASOCIADOS AL EQUIPO SLIM-TUBE.....                     | 36        |
| 4.1.3. ETAPA 2 EJECUCIÓN DE MONTAJE DEL EQUIPO DE MEDIO POROSO DE MAYOR LONGITUD.48 |           |

|            |  |            |
|------------|--|------------|
| 4.1.4.     | ACTIVIDADES REALIZADAS EN EL COHORTE 3.....  | 58         |
| 4.1.5.     | ETAPA 3 PRUEBAS DE VERIFICACIÓN EN CONDICIONES CARACTERÍSTICAS DE YACIMIENTO. ....     | 91         |
| <b>5.</b>  | <b><u>RESULTADOS</u></b> .....   | <b>104</b> |
| 5.1.       | ENTREGABLE 1 .....   | 104        |
| 5.2.       | ENTREGABLE 2 .....   | 106        |
| 5.3.       | ENTREGABLE 3 .....   | 109        |
| 5.4.       | ENTREGABLE 4 .....   | 110        |
| 5.5.       | ENTREGABLE 5 .....   | 112        |
| 5.6.       | ENTREGABLE 6 .....   | 114        |
| <b>6.</b>  | <b><u>ESTRATEGIA DE PROTECCIÓN Y DIVULGACIÓN</u></b> .....                             | <b>126</b> |
| <b>7.</b>  | <b><u>CONCLUSIONES</u></b> .....   | <b>127</b> |
| <b>8.</b>  | <b><u>RECOMENDACIONES</u></b> .....  | <b>128</b> |
| <b>9.</b>  | <b><u>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS</u></b> .....   | <b>130</b> |
| <b>10.</b> | <b><u>ANEXOS</u></b> .....   | <b>132</b> |
| 10.1.      | ANEXO A – PLANO GENERAL DEL ENSAMBLE DEL EQUIPO DE MEDIO POROSO DE MAYOR LONGITUD..... | 132        |
| 10.2.      | ANEXO B – PLANO DEL SLIM-TUBE Y SU BASE.....   | 132        |
| 10.3.      | ANEXO C – PLANO DEL HORNO DIÉS .....   | 133        |
| 10.4.      | ANEXO D – PLANO DE BASE DE ELECTROVÁLVULAS TOMA DE MUESTRA .....                       | 135        |
| 10.5.      | ANEXO E – PLANO DEL SISTEMA DE CONTRA PRESIÓN Y TOMA DE MUESTRAS.....                  | 135        |
| 10.6.      | ANEXO F – PLANO DEL SISTEMA DE INYECCIÓN.....  | 136        |
| 10.7.      | ANEXO G – PLANO DEL SISTEMA DE RECOLECCIÓN DE EFLUENTE .....                           | 137        |
| 10.8.      | ANEXO H – PLANO DE CONFIGURACIÓN DE SENSORES SMAR .....                                | 138        |
| 10.9.      | ANEXO I – PLANO DE BASE (MODIFICADA) DE SENSORES SMAR .....                            | 139        |
| 10.10.     | ANEXO J – PLANO DEL SISTEMA DE MONITOREO Y CONTROL .....                               | 141        |

## LISTA DE FIGURAS

|   |    |
|---|----|
| Figura 1 Técnicas de Análisis de Roca-fluido.....   | 21 |
| Figura 2 Modelo previo Equipo Slim-Tube .....   | 22 |
| Figura 3 REGULADOR DE CONTRAPRESIÓN BPR .....   | 24 |
| Figura 4 Bomba de agua D series.....  | 25 |
| Figura 5 Válvulas automáticas Vindum CV .....   | 26 |
| Figura 6 Smar LD301 .....   | 27 |
| Figura 7 Horno TH720 - DIES.....  | 28 |
| Figura 8 Propuesta inicial del equipo Slim-Tube .....   | 30 |
| Figura 9 Diagrama P&ID equipo Slim Tube .....   | 32 |
| Figura 10 Líneas diagrama P&ID .....  | 33 |
| Figura 11 Simulación Smar en paralelo .....   | 34 |
| Figura 12 Simulación Smar Válvula tres vías .....   | 34 |
| Figura 13 Simulación simplificada de todo el sistema .....  | 35 |
| Figura 14 Cuerpo del equipo Slim-Tube.....  | 37 |
| Figura 15 Horno DiEs .....  | 38 |
| Figura 16 Diseño CAD del horno DiEs, (a) vista isométrica, (b) vista frontal, (c) vista lateral ..... | 39 |
| Figura 17 Soporte de electroválvulas para tomas de muestra.....                                       | 40 |
| Figura 18 Bomba de desplazamiento positivo (izquierda) y cilindros de almacenamiento (derecha) .....  | 41 |
| Figura 19 Recolección de efluente (izquierda), BackPressure Vinci (derecha).....                      | 42 |
| Figura 20 Base existente para ubicar los sensores de presión diferencial .....                        | 43 |
| Figura 21 Base de sensores de presión diferencial con mejora propuesta.....                           | 44 |
| Figura 22 Vistas isométricas y frontal del sistema de contra presión toma de muestras ..              | 45 |
| Figura 23 Vistas superior y lateral del sistema de contra presión toma de muestras.....               | 46 |
| Figura 24 Sistema de control y monitoreo del equipo Slim-Tube.....                                    | 47 |
| Figura 25 Diagrama P&ID Slim Tube .....   | 50 |
| Figura 26 Orden de instalación anillos racor .....  | 51 |
| Figura 27 Plan de conexiones.....   | 52 |
| Figura 28 Soporte sensores de presión diferencial .....   | 53 |
| Figura 29 Soporte en físico para sensores y electroválvulas.....                                      | 54 |
| Figura 30 Base con láminas y electroválvulas.....   | 55 |
| Figura 31 Sensores ubicados en soportes .....   | 56 |
| Figura 32 Adecuación de líneas de tubing .....  | 57 |
| Figura 33 Electroválvulas por conectar .....  | 58 |
| Figura 34 Electroválvulas sin acoplar.....  | 59 |
| Figura 35 Identificación electroválvulas en el sistema hidráulico.....                                | 60 |
| Figura 36 Ajuste acople de electroválvulas con conectores tipo autoclave .....                        | 61 |
| Figura 37 Electroválvulas acopladas.....  | 62 |
| Figura 38 Simulación sistema hidráulico con modificación de las válvulas.....                         | 63 |
| Figura 39 montaje válvulas 3 vías para la toma de muestras .....                                      | 64 |
| Figura 40 Montaje válvulas cheque para toma de muestras .....   | 65 |
| Figura 41 anexo de segmentos de tubing para conexión con el sistema de medición.....                  | 66 |

|  |     |
|--|-----|
| Figura 42 Reducción de tubería de 1/4 a 1/8 .....                                      | 67  |
| Figura 43 conexión Cruz 1 .....  | 68  |
| Figura 44 Conexión cruz 1, bomba y slim tube .....                                     | 69  |
| Figura 45 Tubería omitida por diseño.....  | 70  |
| Figura 46 Conexión electroválvulas con válvula 3 vías .....                            | 71  |
| Figura 47 Unión entre las electroválvulas 1-6 y 5-6.....                               | 72  |
| Figura 48 Electroválvulas con su respectiva marcación. ....                            | 73  |
| Figura 49 Punto alimentación de nitrógeno .....  | 74  |
| Figura 50 Mezcla agua-jabón.....   | 75  |
| Figura 51 Aplicación mezcla agua-jabón para buscar fugas en puntos claves .....        | 75  |
| Figura 52 Presión de nitrógeno utilizada para la prueba de fugas.....                  | 76  |
| Figura 53 Equipos Smar 1,2,3 y 4 con sus respectivos acoples.....                      | 77  |
| Figura 54 Equipos Smar calibrados .....  | 78  |
| Figura 55 Punto de alimentación neumático .....  | 79  |
| Figura 56 Conexión de elementos neumáticos .....                                       | 80  |
| Figura 57 Instalación del sistema eléctrico del Slim tube .....                        | 81  |
| Figura 58 Tablero UPS del laboratorio de química de producción.....                    | 82  |
| Figura 59 Diagrama unifilar Tablero UPS.....   | 83  |
| Figura 60 Protección general del tablero de distribución .....                         | 84  |
| Figura 61 Mini breakers de protección auxiliar .....                                   | 85  |
| Figura 62 Tablero de control equipo Slim tube.....                                     | 86  |
| Figura 63 Mini breaker de 20 A para protección del tablero de control.....             | 87  |
| Figura 64 Fuente de alimentación de las electroválvulas .....                          | 87  |
| Figura 65 Fuente de alimentación de los transmisores inteligentes de presión Smar..... | 88  |
| Figura 66 Fuente de alimentación sistema OPTO.....                                     | 88  |
| Figura 67 Elementos de lectura de presión y temperatura .....                          | 89  |
| Figura 68 Tarjeta de control .....   | 89  |
| Figura 69 Circuito eléctrico general del Slim tube .....                               | 90  |
| Figura 70 Recubrimiento de los diámetros con la malla mesh.....                        | 91  |
| Figura 71 Peso inicial tramo sin empaquetar .....                                      | 92  |
| Figura 72 Proceso de empaquetamiento .....   | 93  |
| Figura 73 Peso final tramo empaquetado .....   | 94  |
| Figura 74 Inyección de aceite mineral con bomba manual Enerpac.....                    | 96  |
| Figura 75 Bomba de inyección Teledyne Isco.....  | 97  |
| Figura 76 Fluido inyectado KCL al 1% .....   | 98  |
| Figura 77 Circuito de prueba.....  | 100 |
| Figura 78 Esquema conexión eléctrica Smar-Arduino.....                                 | 101 |
| Figura 79 Conexión eléctrica Smar-Arduino.....   | 102 |
| Figura 80 Interfaz Labview-Arduino .....   | 103 |
| Figura 81 Vista isométrica del equipo Slim-Tube .....                                  | 104 |
| Figura 82 Vista frontal del equipo Slim-Tube.....                                      | 105 |
| Figura 83 Vista lateral del equipo Slim-Tube.....                                      | 105 |
| Figura 84 Simulación hidráulica y eléctrica del slim tube.....                         | 106 |
| Figura 85 Diseño simulación circuito hidráulico del Slim tube .....                    | 107 |
| Figura 86 Diseño simulación circuito de control eléctrico del slim tube .....          | 108 |
| Figura 87 Montaje del equipo slim tube.....  | 109 |

|            |  |     |
|------------|--|-----|
| Figura 88  | Parámetros para el cálculo de permeabilidad Opto 22 .....            | 110 |
| Figura 89  | Conversión señal de voltaje en valor representativo de presión ..... | 112 |
| Figura 90  | Resultado pruebas en Smar#1 con el Arduino .....                     | 113 |
| Figura 91  | Resultado pruebas en Smar#1 .....                                    | 114 |
| Figura 92  | Resultado pruebas en Smar#2.....                                     | 115 |
| Figura 93  | Resultado pruebas en Smar#3.....                                     | 116 |
| Figura 94  | Resultado pruebas en Smar#4.....                                     | 117 |
| Figura 95  | Resultado pruebas en Smar#5.....                                     | 118 |
| Figura 96  | Resultado pruebas en Smar#6.....                                     | 119 |
| Figura 97  | Resultado pruebas en Smar#7 .....                                    | 120 |
| Figura 98  | Resultado pruebas en Smar#8.....                                     | 121 |
| Figura 99  | Resultado pruebas en Smar#9.....                                     | 122 |
| Figura 100 | Resultado pruebas en Smar#10.....                                    | 123 |
| Figura 101 | Resultado pruebas en Smar#11 .....                                   | 124 |
| Figura 102 | Resultado pruebas en Smar#12.....                                    | 125 |
| Figura 103 | Plano General Equipo Medio Poroso (Slim-Tube).....                   | 132 |
| Figura 104 | Plano Slim-Tube .....  | 133 |
| Figura 105 | Plano Horno de calentamiento DiEs.....                               | 134 |
| Figura 106 | Plano Base Electroválvulas .....                                     | 135 |
| Figura 107 | Plano Sistema de contra presión y toma de muestras.....              | 136 |
| Figura 108 | Plano Sistema de Inyección .....                                     | 137 |
| Figura 109 | Plano sistema de Recolección de Efluente .....                       | 138 |
| Figura 110 | Plano Sistema de Medición de presión Diferencial.....                | 139 |
| Figura 111 | Plano Soporte (modificado) de Sensores Smar.....                     | 140 |
| Figura 112 | Plano Sistema de Monitoreo y Control .....                           | 141 |

## LISTA DE TABLAS

|   |     |
|---|-----|
| Tabla 1. Ficha técnica Modelo previo <i>Slim-Tube</i> .....                     | 23  |
| Tabla 2. Características regulador de contra presión. ....                      | 24  |
| Tabla 3. Características Bomba de agua D series .....                           | 25  |
| Tabla 4. Características Válvulas automáticas Vindum CV .....                   | 26  |
| Tabla 5. Característica Smar LD301 .....  | 27  |
| Tabla 6. Características Horno TH720 -DIES.....                                 | 28  |
| Tabla 7 Puntos de toma de presión diferencial .....                             | 36  |
| Tabla 8 Condiciones generales de la muestra .....                               | 94  |
| Tabla 9 Parámetros del empaquetamiento .....                                    | 94  |
| Tabla 10 Características fisicoquímicas del KCl 1%.....                         | 99  |
| Tabla 11 Permeabilidades obtenidas en pruebas con el Smar # 1 con Arduino ..... | 113 |
| Tabla 12 Datos de la muestra .....  | 114 |
| Tabla 13 Permeabilidades obtenidas en pruebas con el Smar # 1 .....             | 115 |
| Tabla 14 Permeabilidades obtenidas en pruebas con el Smar #2.....               | 115 |
| Tabla 15 Permeabilidades obtenidas en pruebas con el Smar #3.....               | 116 |
| Tabla 16 Permeabilidades obtenidas en pruebas con el Smar #4.....               | 117 |
| Tabla 17 Permeabilidades obtenidas en pruebas con el Smar #5.....               | 118 |
| Tabla 18 Permeabilidades obtenidas en pruebas con el Smar #6.....               | 119 |
| Tabla 19 Permeabilidades obtenidas en pruebas con el Smar #7.....               | 120 |
| Tabla 20 Permeabilidades obtenidas en pruebas con el Smar #8.....               | 121 |
| Tabla 21 Permeabilidades obtenidas en pruebas con el Smar #9.....               | 122 |
| Tabla 22 Permeabilidades obtenidas en pruebas con el Smar #10.....              | 123 |
| Tabla 23 Permeabilidades obtenidas en pruebas con el Smar #11 .....             | 124 |
| Tabla 24 Permeabilidades obtenidas en pruebas con el Smar #12.....              | 125 |

## RESUMEN EJECUTIVO

El proyecto desarrollado consiste en la Adaptación de medio poroso de mayor longitud con pruebas de verificación, empezando con el diseño del equipo Slim tube y de cada uno de los elementos que lo componen a través de programas Cad, esto con la finalidad de facilitar la construcción del equipo, posteriormente se realiza el montaje de los componentes del Slim tube: Transmisores de presión diferencial Smar, electroválvulas, válvulas, conectores, reductores y tubería. Finalizado el montaje se procede a realizar pruebas de verificación en condiciones similares de yacimiento, con los resultados obtenidos se concluye que a diferentes tasas de caudal inyectado de KCl en el sand pack de prueba se cumple el principio de permeabilidad de Darcy. Se concluye que el sistema del equipo del Slim tube está finalizado y listo para realizar pruebas de laboratorio.

**PALABRAS CLAVE.** Permeabilidad, Recobro, Presión, porosidad, adaptación.



## INTRODUCCIÓN

La industria petrolera se ha caracterizado por ser una de las industrias más relevantes del planeta, responsable de aportar más de la mitad de la energía demandada en el mundo y gran variedad de productos de consumo, desde plásticos hasta medicinas. La continua globalización y expansión de la humanidad ha ocasionado un incremento en la demanda de producción de crudo, a tal punto que muchos yacimientos de explotación se han agotado.

Las técnicas de extracción como el bombeo mecánico convencional sirven para extraer los crudos livianos de los yacimientos, pero cuando estos crudos se agotan, se necesitan técnicas mejoradas para la extracción, ahí es donde las técnicas de recobro juegan un papel importante, desde el recobro secundario, el cual utiliza fluidos propios del yacimiento inyectándolos a presión para sacar el crudo más pesado, al recobro terciario que utiliza inyección de fluidos que no pertenecen a yacimiento como lo son agua mejorada y micro geles.

Desde hace varios años Ecopetrol decidió implementar técnicas de recobro mejorado en algunos de sus pozos de producción y debido a los buenos resultados que ha obtenido, el Centro de Innovación y Tecnología – ICP ha enfocado su interés en investigaciones y ensayos que ayuden a desarrollar técnicas más precisas y eficientes de recobro mejorado.

Por este motivo el diseño, montaje y adaptación del equipo *Slim-Tube* es de vital importancia para continuar con el desarrollo de técnicas de recobro mejorado que puedan ser implementados en los yacimientos de petróleo.

## 1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

### 1.1. Descripción de la Problemática

Debido a la alta demanda y continua extracción de petróleo, las reservas de crudo en Colombia paulatinamente se están agotando, por esto es importante extraer la mayor cantidad de este recurso, utilizando el bombeo convencional se logra la captación de hidrocarburos livianos, pero a través de técnicas y equipos como el de medio poroso que se basan en el recobro, se logra la extracción de crudo pesado, aprovechando en gran medida los recursos que se hallan en los yacimientos, es por ello que existe la necesidad de experimentar en el laboratorio maneras más prácticas, eficientes e innovadoras de mejorar estas técnicas de extracción. Como problemáticas principales en la extracción de crudos pesados se resaltan las siguientes: pozos de hidrocarburos conectados a acuíferos, alta gravedad API, alta viscosidad y daños ocasionados en el proceso de perforación que afectan la formación beneficiando la movilidad de agua. Teniendo presente estas problemáticas se hace necesario la implementación de tecnologías que permitan la producción de crudo con un bajo costo y que incrementen el factor de recobro, como consecuencia, se decide invertir recursos en el diseño y adaptación de un equipo de medio poroso de mayor longitud que permita identificar las variables más significativas y de esta forma realizar pruebas de experimentación que aporten mejores resultados y que permitan viabilizar procesos de recobro en activos de Ecopetrol.

¿Cuáles deben ser los parámetros de instalación y funcionamiento del equipo de medio poroso de mayor longitud para una óptima operación y simulación de condiciones de campo cumpliendo con todas las normativas del Laboratorio de Optimización de Producción & Recobro mejorado del Centro de Innovación y Tecnología-ICP?

## 1.2. Justificación del Desarrollo

Como parte fundamental del crecimiento de Ecopetrol, el recobro mejorado se ha convertido en uno de los *cores* de la compañía, en el Laboratorio de Producción y Recobro Mejorado del Centro de Innovación y Tecnología-ICP, se investiga sobre las técnicas a implementar en los yacimientos actuales de manera que se pueda aprovechar la mayor cantidad de hidrocarburo presente, que de otra manera no se podría obtener con técnicas de extracción convencionales.

Ante la necesidad de mejorar la técnica de recobro utilizado para la extracción de hidrocarburos, se realiza el proceso de diseño, montaje y operación del equipo de medio poroso de mayor longitud o también conocido como slim tube en el laboratorio de optimización y recobro mejorado del ICP, esto con el fin de emular las condiciones de campo y hallar resultados que aporten en el mejoramiento del proceso de recobro.

El estudio en medios porosos en longitudes de hasta 30 ft traerá beneficios, ya que se podrá hacer ensayos en laboratorio para diferentes yacimientos colombianos, de tal forma que se pueda determinar las formas más eficientes para el recobro dependiendo de las condiciones de los campos evaluados; para lograr tal fin se aprovecha la cooperación con las Unidades Tecnológicas de Santander para usar los conocimientos, metodologías y formación académica adquiridas a lo largo de la formación académica de los coinvestigadores implicados en el desarrollo del proyecto.

### **1.3. Objetivos**

#### **1.3.1. Objetivo General**

Adaptar el equipo de medio poroso de mayor longitud realizando el diseño y montaje para poder ejecutar pruebas de desplazamiento a condiciones de presión y temperaturas de yacimiento.

#### **1.3.2. Objetivos Específicos**

- Diseñar el equipo de medio poroso a través de herramientas digitales como los programas tipo CAD y simuladores para facilitar la construcción del slime tube.
- Ensamblar el equipo de medio poroso de mayor longitud siguiendo las indicaciones de fábrica de cada elemento para asegurar que el equipo funcione en óptimas condiciones.
- Realizar pruebas de verificación modificando los parámetros de operación requeridos para obtener los valores nominales del sistema en cuestión.

## 2. MARCO REFERENCIAL

### 2.1. Marco Teórico

Ecopetrol S.A se ha dedicado a lo largo de su historia desde que fue creada el 25 de agosto de 1951 a la exploración, producción, transporte, refinación y comercialización de hidrocarburos.

Como uno de sus principales eslabones en la industria petrolera tenemos las operaciones de recuperación de las cuales consultando texto referente al tema podemos encontrar tres divisiones primaria, secundaria y terciaria de las cuales tenemos las siguientes definiciones pero antes de abordar estos temas se definirá que es un hidrocarburo según el autor del libro el Refino del petróleo “Los hidrocarburos constituyen los elementos esenciales del petróleo; sus moléculas no contienen más que carbono e hidrogeno y se dividen en varias familias químicas según su estructura. Todas estas estructuras están basadas en la tetravalencia del carbono.”(Wauquier, J. P. (2004). *El Refino del Petróleo. Madrid: Díaz de Santos.*, s. f.)

En consecuencia, las operaciones de recuperación se definen:

La etapa primaria, producción inicial, resulta del desplazamiento por la energía natural existente en el yacimiento. La secundaria, que actualmente es casi sinónima de inyección de agua, se implementa usualmente después de la declinación de la producción primaria. Entre estos procesos, los tradicionales son: la inyección de agua y la inyección de gas.

La recuperación secundaria resulta del aumento de la energía natural, al inyectar agua o gas para desplazar el petróleo hacia los pozos productores.

En cuanto a la recuperación terciaria, la tercera etapa de producción, es la que se obtiene después de la inyección de agua (o cualquier otro proceso secundario utilizado). Los procesos terciarios utilizan gases miscibles, químicas y/o energía térmica para desplazar petróleo adicional después de que un proceso secundario se vuelve no rentable. (*Paris de Ferrer, M. (2001). Inyección de agua y gas en yacimientos petrolíferos. Maracaibo: Astro Dala S.A., s. f.*)

Para disponer de un contexto más general sobre el tema del proyecto, a continuación, hay una serie de definiciones de terminología afín.

### **2.1.1. Petróleo:**

Es una mezcla de hidrocarburos, suele ser un líquido aceitoso oscuro formado por sedimentación de materia orgánica atrapada en el subsuelo durante miles de años a altas presiones y temperaturas, se considera un recurso no renovable y actualmente el más importante del mundo, del cual se derivan muchos productos y combustibles. Petróleo. («Petróleo», 2022)

### **2.1.2. Hidrocarburo**

Los hidrocarburos son sustancias químicas orgánicas presentes en la naturaleza en diferentes estados, ya sea en vapor (gas natural), líquido (crudo liviano), sólido (hidrocarburos pesados), los cuales están compuestos en su mayoría por átomos de hidrógeno y carbono. En su gran mayoría estos son tóxicos y explosivos, gracias a estas propiedades poseen la capacidad de liberar grandes cantidades de energía que pueden ser aprovechadas para satisfacer las demandas energéticas globales, aproximadamente el 96% de la energía consumida en el mundo es suministrada por los hidrocarburos de ahí su gran importancia. (*Los Hidrocarburos.pdf, s. f.*)

### **2.1.3. Recobro Mejorado**

Este método se basa en la recuperación de hidrocarburos con técnicas no convencionales que modifican las propiedades originales del petróleo, de manera que se pueda obtener la mayor cantidad de hidrocarburo de un yacimiento existente, por medio de técnicas de inyección de fluidos como agua, vapor y gas. (*eor*, s. f.)

### **2.1.4. Viscosidad**

Es una propiedad termo física de los fluidos la cual es consecuencia de las fuerzas internas moleculares de cohesión, en los gases se genera por el rozamiento de las moléculas, por tal razón se requiere de la aplicación de un esfuerzo externo para mover el líquido o el gas. Por naturaleza los fluidos poseen una resistencia a la viscosidad que está dada por la velocidad. (*Viscosidad - EcuRed*, s. f.)

### **2.1.5. Coreflooding**

Son pruebas de laboratorio en las cuales se inyectan líquidos a muestras de roca de yacimientos petrolíferos, bajo condiciones de presión y temperatura adecuadas, las cuales se encargan de medir la permeabilidad, permeabilidad relativa cambio de saturación y formación de daño causado por la inyección de fluido. Esta técnica es usada para determinar la optimización en un yacimiento evaluando el efecto de inyección de fluidos para tener un buen EOR. (*coreflooding*, s. f.)

### **2.1.6. Medio Poroso**

Un medio poroso se puede presentar en la roca o el suelo por el cual puede trasegar fluidos a través de él, principalmente se puede apreciar este diseño de terreno en las reservas de los yacimientos en donde dentro del medio poroso de las rocas, se puede

encontrar arena y agua dentro de los espacios de la roca y justo a las partículas de crudo presentes en la misma. (*medio poroso | Oilfield Glossary*, s. f.)

### **2.1.7. Densidad API**

Los grados API o gravedad API es una medida de densidad relativa que compara las propiedades del agua a temperaturas de 60 °F y precisa cuan pesado o liviano es el petróleo, cuanto más alto es el índice menor es la densidad del crudo, los crudos cuyos valores son inferiores a 27 API se consideran pesados y los que están por encima de los 40 API se consideran livianos. (*Grados API y gravedad específica de los hidrocarburos - combustibles líquidos*, 2013)

### **2.1.8. Yacimiento:**

Es una formación de tipo geológico en donde se encuentran grandes cantidades de minerales, y en donde se interesa estudiar las dimensiones, la calidad, cantidad y profundidad para su explotación y aprovechamiento económico. Yacimiento. («Yacimiento geológico», 2021)

### **2.1.9. Porosidad:**

Se considera como una propiedad de los materiales relacionada a los espacios vacíos o poros que estos presenten en su estructura, está relacionado con la permeabilidad, debido a que los poros permiten cierta absorción de los fluidos. (*Definición de porosidad — Definicion.de*, s. f.)

### **2.1.10. Permeabilidad**

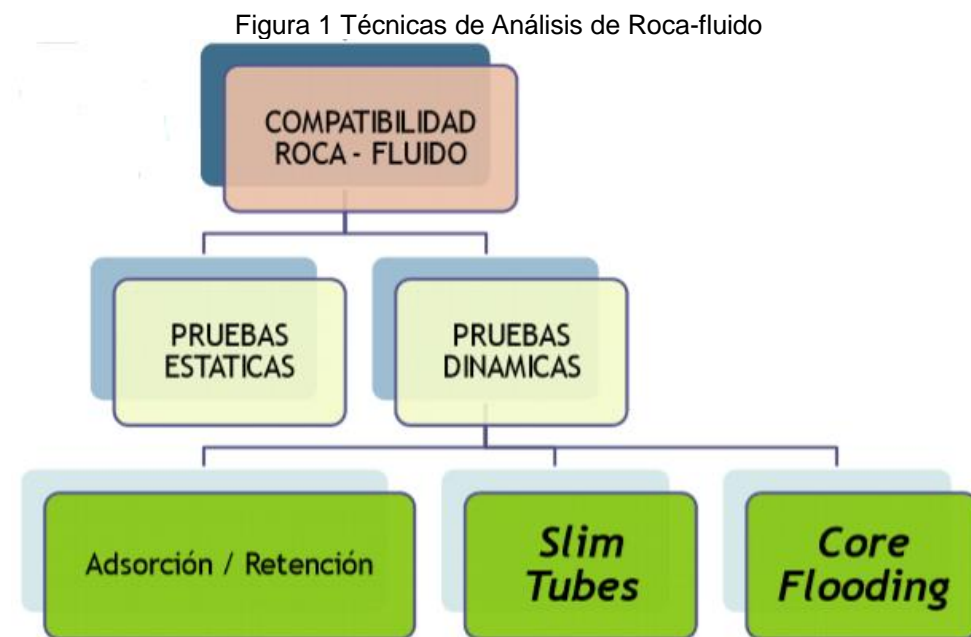
La permeabilidad es una característica que poseen los materiales, la cual permite que un flujo lo atraviese, ya sea por su largo o ancho. Para que un material sea permeable a un fluido, este debe sufrir un cambio momentáneo inducido por el flujo o ser capaz de



modificar el flujo en sí mismo. La unidad para la permeabilidad de las rocas que integran los yacimientos petroleros en concreto es una unidad del sistema c.g.s llamada Darcy, que equivale a, D ( $9,86923 \cdot 10^{-23} \text{ m}^2$ ). (Bolívar, 2020)

### 2.1.11. *Equipo Slim – Tube*

El equipo de *Slim-Tube* provee una manera controlada y muy aproximada a la realidad, de cómo las diferentes técnicas de inyección y composición química de salmueras usadas pueden ayudar a obtener la permeabilidad adecuada para ser implementadas en campo. En la Figura 1, se muestra la clasificación en la cual se encuentran las diferentes técnicas de laboratorio.



Fuente: (140967.pdf, s. f.)

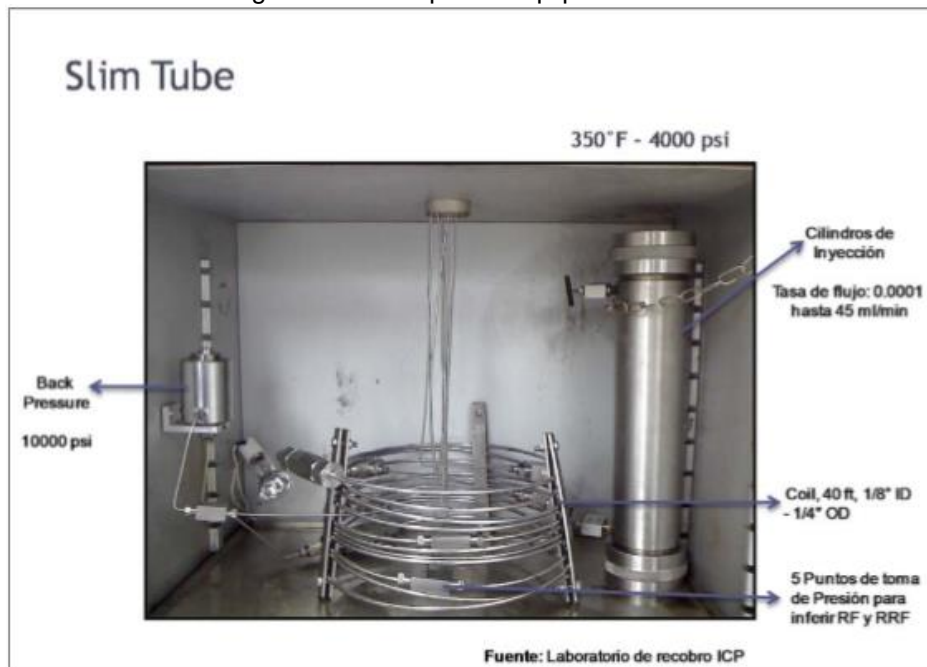
En el interior del equipo *Slim-Tube* se realizan pruebas para determinar la permeabilidad en roca extraída de yacimiento o bien arena especial que emule las condiciones de la

misma, mediante la inyección de diferentes fluidos se determina el comportamiento del desplazamiento de los fluidos inyectados a condiciones de yacimiento.

Estas 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 ( $k$ ) de forma experimental, todos estos parámetros se analizan en el área experimental de recobro mejorado (140967.pdf, s. f.)

En la Figura 2 se puede apreciar un modelo del equipo *Slim Tube* y en la Tabla 1 la respectiva ficha técnica.

Figura 2 Modelo previo Equipo Slim-Tube



Fuente(140967.pdf, s. f.)

**TABLA 1. FICHA TÉCNICA MODELO PREVIO *SLIM-TUBE***

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

Fuente: (140967.pdf, s. f.)

Algo importante a resaltar es que este equipo se construyó para realizar estudios de inyección de CDG, en el campo Campo Dina Cretáceo (DK), siendo el primer proyecto piloto en Colombia que ha incrementado el factor de recobro terciario.

### 2.1.12. Regulador de contrapresión BPR

El regulador de contrapresión o como es comúnmente llamado “*Backpressure*” es un elemento que es usado para mantener una presión constante en estudio de flujo. Su funcionamiento consiste en dos cámaras separadas por medio de un pistón, su trabajo consiste en comparar las presiones de las cámaras, cuando la presión de la cámara superior es mayor que la inferior, una aguja cierra la salida permitiendo que aumente la presión. Cuando la presión inferior es mayor a la de la cámara superior la aguja se abre para liberar fluido hacia afuera, de esta forma se tiene una regulación precisa de la presión. (Vinci Technologies | *Back pressure regulator (BPR series)*, s. f.)

Figura 3 REGULADOR DE CONTRAPRESIÓN BPR



Fuente: (Vinci Technologies | *Back pressure regulator (BPR series)*, s. f.)

Dentro de las características se puede detallar las especificaciones técnicas en la Tabla 2.

**TABLA 2. CARACTERÍSTICAS REGULADOR DE CONTRA PRESIÓN.**

| Características  |                                     |
|------------------|-------------------------------------|
| Rango de presión | Hasta 10,000-15,000-20,000 psi      |
| Material         | Acero inoxidable o hastelloy        |
| Temperatura      | Hasta 150°C (300F)                  |
| Caudales         | De 0,0001 a 50 cc/min               |
| Tipos de fluidos | Gas, Líquido, fluidos supercríticos |

Fuente: (*Vinci Technologies | Back pressure regulator (BPR series)*, s. f.)

### 2.1.13. **Bomba de agua D series**

Este elemento permite la entrega de un flujo continuo y exacto mediante un sistema de dos módulos donde un regulador rellena una bomba mientras que la otra entrega fluido de una manera precisa usando algoritmos para su trabajo. (*D series - Bomba de agua by Teledyne Isco | DirectIndustry*, s. f.)

Figura 4 Bomba de agua D series



Fuente: (*D series - Bomba de agua by Teledyne Isco | DirectIndustry*, s. f.)

Dentro de las características técnicas podemos encontrar las especificaciones en la Tabla 3.

**TABLA 3. CARACTERÍSTICAS BOMBA DE AGUA D SERIES**

| Características       |                                |
|-----------------------|--------------------------------|
| Fluido                | agua                           |
| Accionamiento         | neumática                      |
| Otras características | Doble, de flujo continuo       |
| Caudal                | Máx. 0,3 l/min<br>Mín. 0 l/min |
| Presión               | Máx. 0,3 l/min<br>Mín. 0 l/min |

Fuente: (Industry, 2021)

### 2.1.14. Válvulas automáticas Vindum CV

Las electroválvulas permiten acción remota en menos de 0,1 segundos, mediante aire comprimido y una válvula solenoide, cuenta con un sistema en el que el volumen del fluido interno no cambia cuando se abre o cierra. (Vindum Engineering, s. f.)

Figura 5 Válvulas automáticas Vindum CV



Fuente: (Vindum Engineering, s. f.)

Dentro de las características técnicas podemos encontrar las siguientes especificaciones en la Tabla 4.

**TABLA 4. CARACTERÍSTICAS VÁLVULAS AUTOMÁTICAS VINDUM CV**

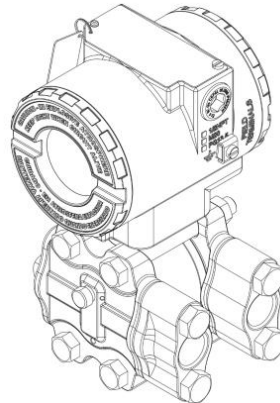
| Características                 |               |
|---------------------------------|---------------|
| Gama de modelo                  | 25,000 psi    |
| Modelos                         | De 2 o 3 vías |
| Apertura/cierre aire comprimido | 70-100 psi    |
| Electroválvula piloto           | 12V o 24V     |
| Para tubería de                 | 1/8" o 1/4"   |

Fuente: (Vindum, 2022)

### 2.1.15. *Transmisor inteligente de presión smar LD301*

La medida entre dos puntos las podemos tomar gracias al equipo smar LD301 los cuales son configurables con diferentes tipos de software. El ajuste de cero y span, totalización, setpoint se pueden hacer con el desarmador magnético.(Digital, s. f.)

Figura 6 Smar LD301



Fuente: (Digital, s. f.)

Dentro de las características técnicas se puede encontrar las especificaciones en la Tabla 5.

**TABLA 5. CARACTERÍSTICA SMAR LD301**

| Características      |                           |
|----------------------|---------------------------|
| Rango de presión     | 0 - 60 psi<br>0 – 3600psi |
| Salida de transmisor | 4mA – 20mA                |
| Temperatura          | Máx. 60°C                 |

Fuente: (Digital, s. f.)

### 2.1.16. Horno Thermolab TH720 – DIES

En el área experimental de recobro no térmico se encuentra un horno Thermolab TH720 fabricado por la marca colombiana DIES empresa dedicada al diseño y fabricación de equipos necesarios en laboratorio. El horno está destinado para ser parte del equipo Slim Tube deforma que ya tiene modificaciones en su estructura de acuerdo al requerimiento del proyecto, entre las cualidades que se pueden resaltar del horno encontramos que mantiene temperatura constante mediante algoritmo de control PID.(«THERMOLAB TH720», s. f.)

Figura 7 Horno TH720 - DIES



Fuente: («THERMOLAB TH720», s. f.)

Dentro de las características técnicas se encuentran las siguientes especificaciones en la Tabla 6.

**TABLA 6. CARACTERÍSTICAS HORNO TH720 -DIES**

| Características      |                      |
|----------------------|----------------------|
| Rango de temperatura | +10°C ~ 200°C        |
| Algoritmo de control | PID                  |
| Material             | Acero inoxidable 304 |
| Voltaje              | 220V                 |
| Capacidad            | 720 litros           |

Fuente: (DIES, 2022)



### **3. DISEÑO DE LA INVESTIGACION**

La metodología aplicada al proyecto es de tipo descriptivo, ya que detalla cada elemento que compone el equipo Slim tube; a su vez se describen las fases de desarrollo del proyecto. El paradigma de esta investigación es de tipo mixto debido a que contiene características de tipo cualitativas como cuantitativas, orientándose a explicar las funciones de cada elemento y a su vez las cantidades en cuestión de número de piezas, valores técnicos de funcionamiento y resultados. Los instrumentos de investigación usados para el desarrollo de esta investigación fueron: la observación, donde se detalló las necesidades a solucionar con la organización del montaje del equipo Slim Tube; además del análisis realizado del funcionamiento y comportamiento. Las técnicas implementadas se basaron en la experimentación, realizando diversas pruebas cuya finalidad eran verificar el funcionamiento adecuado del equipo instalado.

El desarrollo del proyecto se realizó basándose en los tres objetivos específicos, siendo así como se dividió en tres principales fases:

1. Diseño digital a través de programas tipo Cad de los componentes del slim tube.
2. Montaje y adaptación de tuberías, accesorios, válvulas y transmisores.
3. Realización de pruebas de verificación del sistema instalado.

## 4. DESARROLLO DEL TRABAJO DE GRADO

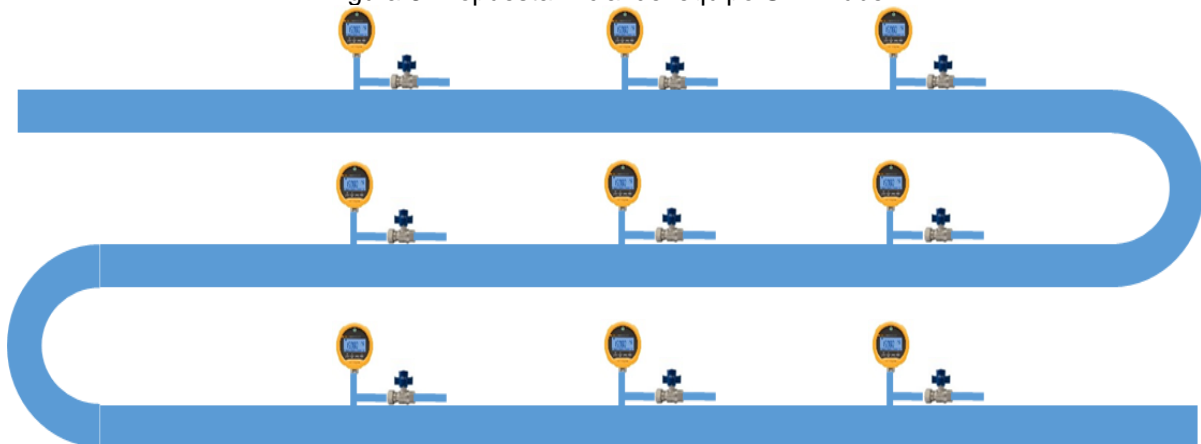
### 4.1.1. Etapa 1 Diseño del equipo de medio poroso de mayor longitud

se presenta el diseño y el plano del ensamble del equipo completo, con base en los componentes disponibles, los lineamientos de seguridad, el espacio disponible y todas las sugerencias recomendaciones presentadas por la líder del laboratorio.

La base de este proyecto nace en la idea original por parte del laboratorio de optimización de producción y recobro mejorado de tener en sus instalaciones el equipo *Slim-Tube*, útil para desarrollar ensayos de factibilidad de inyección de fluidos a muestras de rocas representativas del yacimiento bajo estudio y evaluar su desempeño final.

Originalmente la idea propuesta para el equipo *Slim-Tube*, se muestra en la Figura 8:

Figura 8 Propuesta inicial del equipo Slim-Tube



Fuente: Ecopetrol

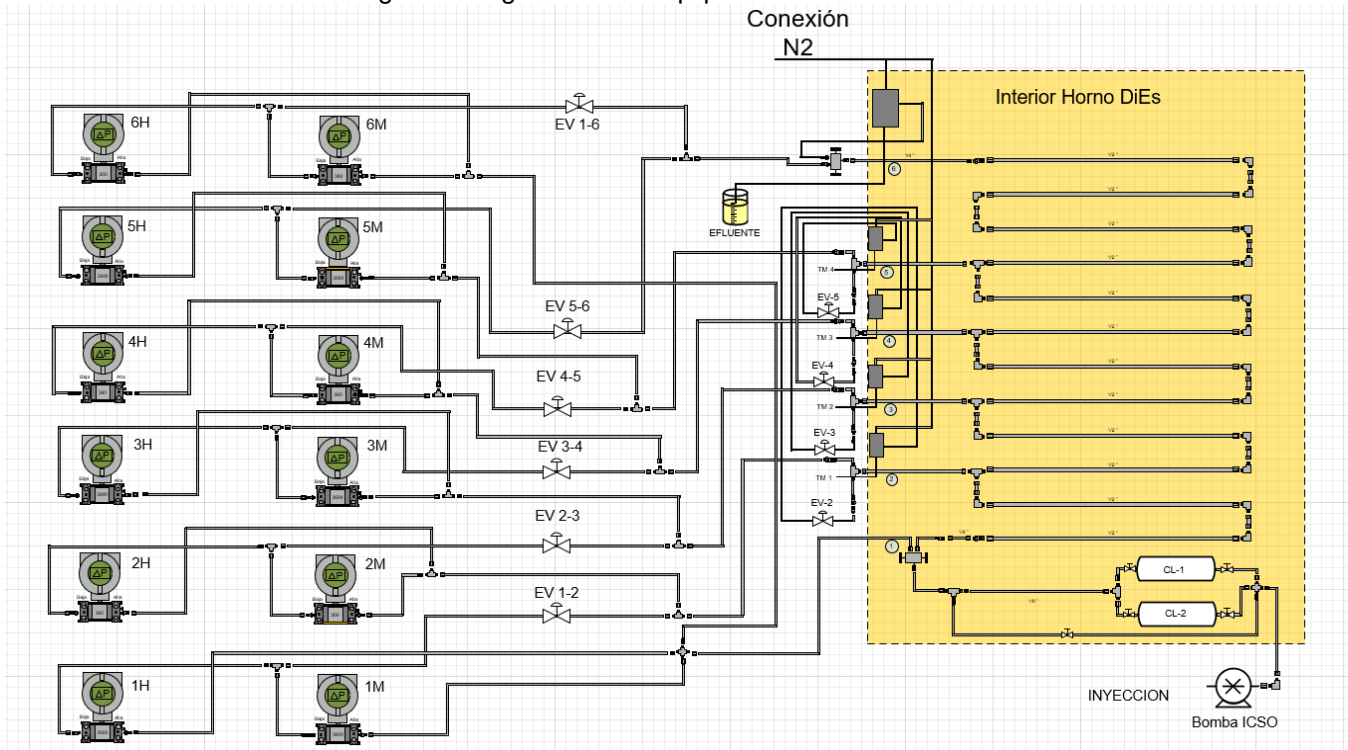
**Características:**

- Dimensiones del Slim: 30 pies de tubería de media pulgada de diámetro.
- Volumen a empacar: 1.2 Lt 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 empacados, con roca representativa de yacimiento en estudio.

De acuerdo al diseño que se le había presentado al área experimental de recobro no térmico y al espacio disponible para el montaje del equipo, se llegó a la conclusión que no se pueden implementar los 9 puntos de medición de presión diferencial, debido a que la cantidad de sensores Smar disponibles solo pueden cubrir 6 puntos de presión, además el horno de calentamiento DiEs ya está adecuado con los agujeros necesarios para 6 puntos de medición y para la tubería requerida para el montaje.

Con base en lo anterior se planteó el diseño final, el cual se muestra en la Figura 9.

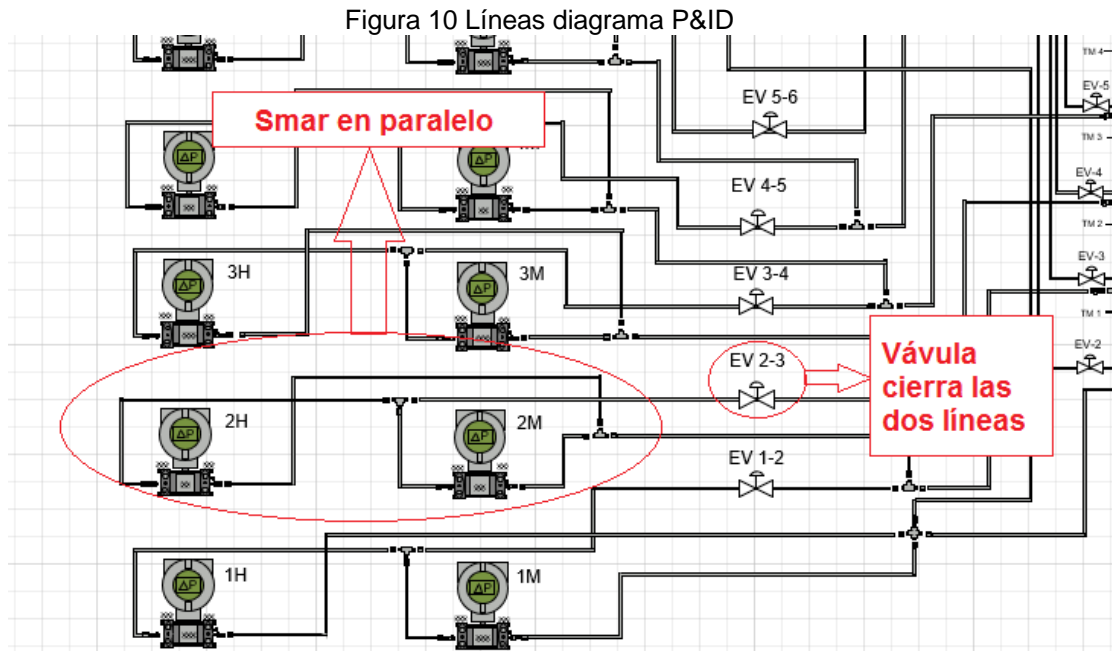
Figura 9 Diagrama P&ID equipo Slim Tube



Fuente: Autor

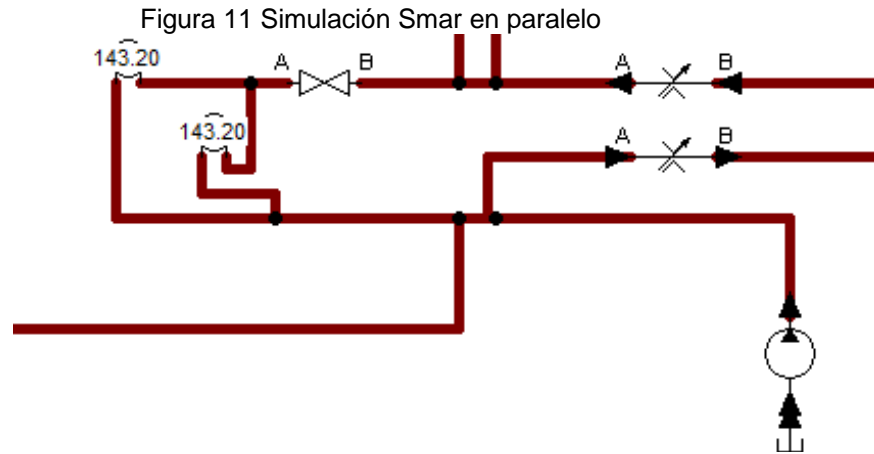
En el diagrama P&ID (*Piping and Instrumentation Diagram*), de la figura anterior, se puede observar la conexión y ubicación de los instrumentos necesarios para la inyección, toma de muestras, tomas de presión diferencial y tomas de efluente del equipo.

En el análisis del diagrama P&ID, el equipo Slim Tube, se puede apreciar que en cada punto de medición de presión diferencial se ubican dos sensores Smar, en paralelo sin posibilidad de conmutar entre ellos para aumentar o disminuir el rango de medición y con una electroválvula que, al cerrar, aísla los dos sensores de presión sin posibilidad de tomar medidas en ningún rango como se puede identificar a continuación en la Figura 10.



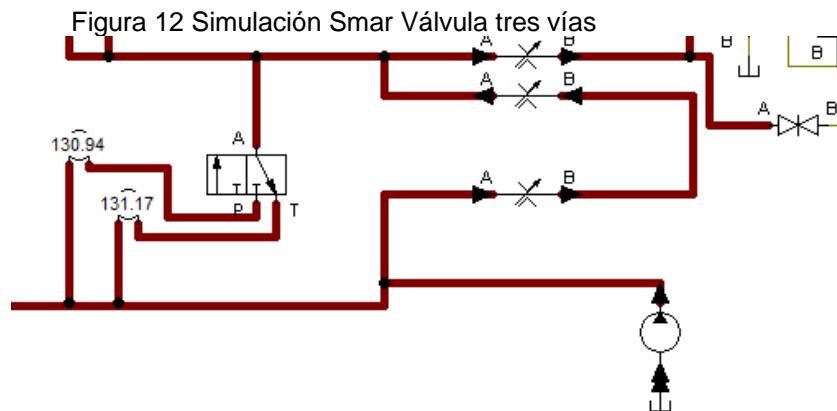
Fuente: Autor

Con esta apreciación se decide hacer una simulación mediante el programa FluidSIM Hidráulica 4.5 Esp, en busca de comprender mejor el sistema y se encontró que en efecto con la configuración mostrada los Smar tomarían igual medida a lo largo del tiempo y al cerrar la válvula se aíslan los sensores de presión sin posibilidad de tomar medidas, la captura de las pruebas de simulación se comparte en la Figura 11.



Fuente: Autor

Teniendo esto presente se procede a realizar cambios en la configuración de las líneas que permitan tener, un rango más amplio en la toma de medidas de presión diferencial mediante los dos sensores de presión Smar presentes. Esto se logra cambiando la válvula de cierre por una válvula de tres vías como se evidencia en la Figura 12.

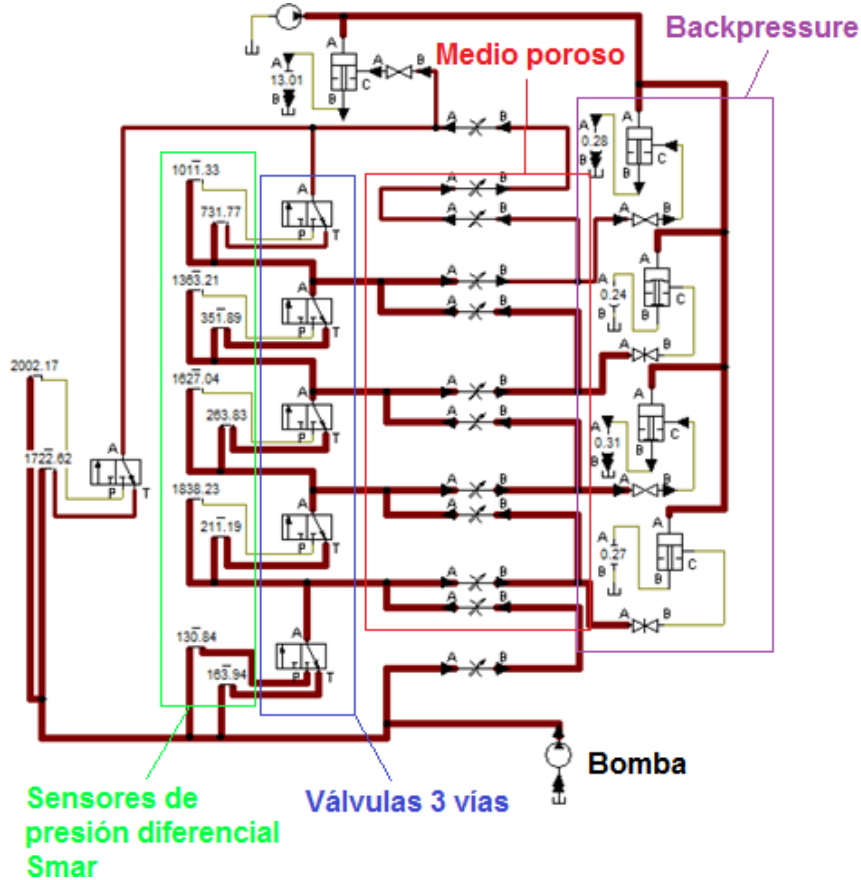


Fuente: Autor

Con este cambio en la configuración se consigue el efecto esperado y se replica para los demás puntos de medición. Como parte final del diagrama P&ID se genera simulación simplificada de la

mayoría de elementos que participan en el sistema, como se ilustra en la Figura 13 .

Figura 13 Simulación simplificada de todo el sistema



Fuente: Autor

La simulación simplificada del Equipo Slim Tube muestra el comportamiento deseado para su fácil compresión, demarcando las partes más relevantes del equipo, por lo tanto; se ha marcado dentro un cuadro verde los sensores de presión diferencial los cuales hay dos por punto de toma de medida,

para tener mayor rango de medición y se alternan por medio de las válvulas de tres vías que están encerradas dentro el rectángulo azul, siguiendo de izquierda a derecha se tiene en el rectángulo rojo, que encierra el serpentín que representa el medio poroso y el cual está dentro del horno Dies, en este lugar es donde se aloja las muestras de arenisca, ya como parte final tenemos el rectángulo morado donde se ubican los comparadores de presión “Backpressure” los cuáles serán los encargados de mantener la presión dentro del sistema y permitirán la toma de muestras, con este análisis terminado se puede establecer que el diseño está listo para la realización de un nuevo diagrama P&ID que ilustre de mejor forma las conexiones y demás elementos que se implementan en la adecuación del equipo.

Tabla 7 Puntos de toma de presión diferencial

| Puntos de medición | Puntos de medición de presión diferencial | Distancia entre puntos (pies) |
|--------------------|---|-------------------------------|
| Punto 1            | Entre 1 y 2                               | 5.2'                          |
| Punto 2            | Entre 2 y 3                               | 5'                            |
| Punto 3            | Entre 3 y 4                               | 5'                            |
| Punto 4            | Entre 4 y 5                               | 5'                            |
| Punto 5            | Entre 5 y 6                               | 9.8'                          |
| Punto 6            | Entre 1 y 6                               | 30'                           |

Fuente: Autor

#### **4.1.2. Equipos y componentes asociados al equipo Slim-Tube**

##### **4.1.2.1 Cuerpo del Slim-Tube y su base**

Se puede decir que la parte central de todo el equipo es el cuerpo del *Slim-Tube*, el cual está conformado por una serie de tubos de acero de referencia SS316, de la marca Swagelock, de diámetro de media pulgada y una longitud total de 30ft. La geometría



seleccionada de serpentín recto, hace mucho más fácil su empaquetamiento y monte y desmonte, en la Figura 14 se puede apreciar la imagen del modelo.

Figura 14 Cuerpo del equipo Slim-Tube



Fuente: Autor

En la sección de anexos se encuentra el plano detallado, con sus medidas, cantidad de accesorios y las referencias de cada uno de las partes que lo componen.

#### 4.1.2.2 Horno de calentamiento

El Horno de calentamiento DiEs se calibró y su estado actual es funcional, ya está adecuado con los puntos de presión diferencial, toma de muestra del fluido, inyección y toma de efluente del equipo, en la Figura 15 se encuentra su imagen.

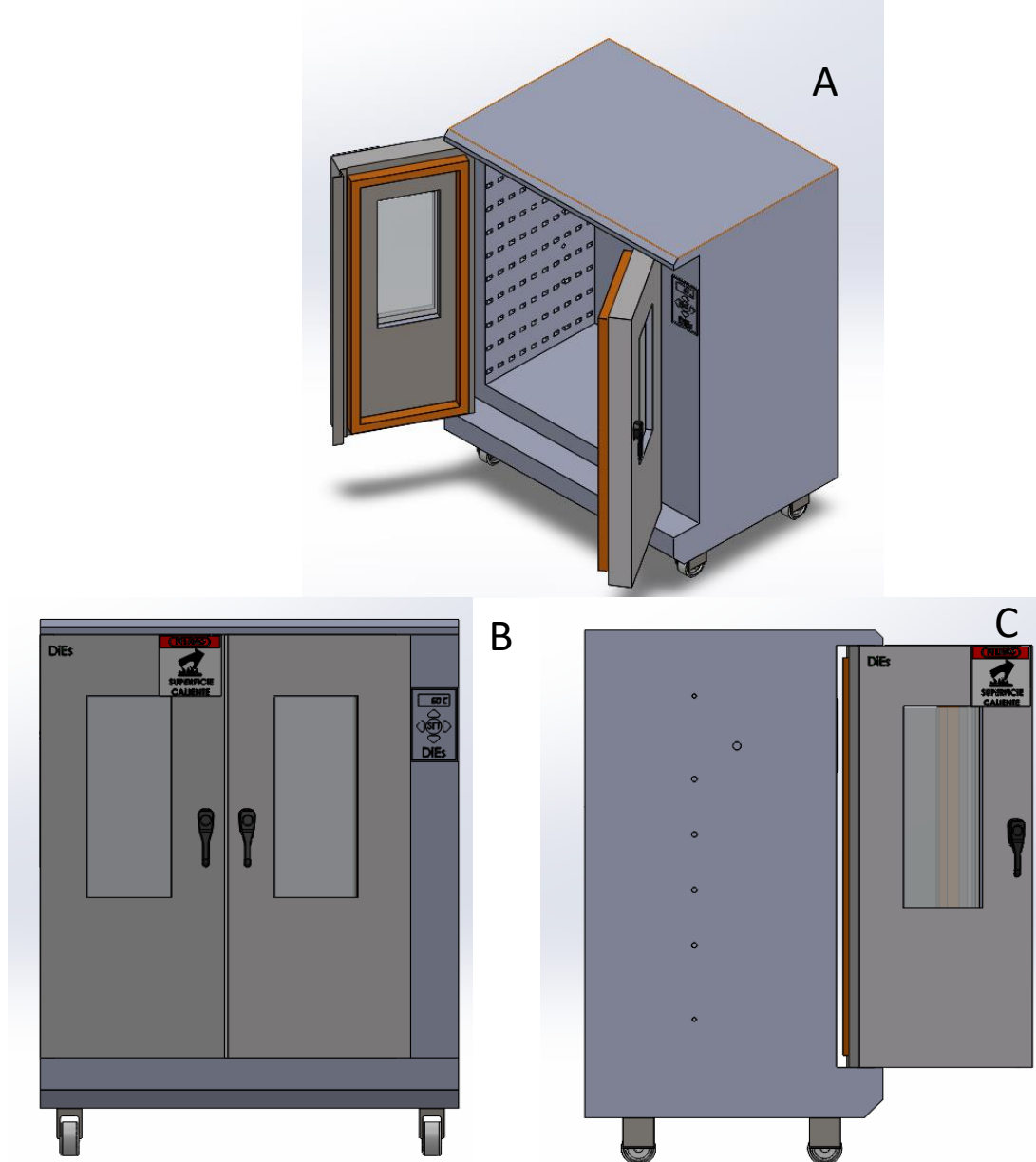
Figura 15 Horno DiEs



Fuente: Autor

La figura anterior hace referencia al mismo horno que se utiliza para el equipo, a continuación, se presentan el modelo CAD del horno con sus adecuaciones en la Figura 16.

Figura 16 Diseño CAD del horno DiEs, (a) vista isométrica, (b) vista frontal, (c) vista lateral



Fuente: Autor

En la sección de anexos se encuentra un plano detallado del horno, con las dimensiones y adecuaciones .

### 4.1.2.3 Electroválvulas para tomas de muestras de fluido

El siguiente sistema que comprende el equipo *Slim-Tube*, cumple la función de permitir la regulación del fluido inyectado a través de tuberías y hacia electroválvulas ubicadas en el lateral del horno DiEs, que permiten tomar la muestra de fluido a lo largo del cuerpo del Slim-Tube cada vez que sea necesario, en la Figura 17 se presenta el CAD del soporte.

Figura 17 Soporte de electroválvulas para tomas de muestra



Fuente: Autor

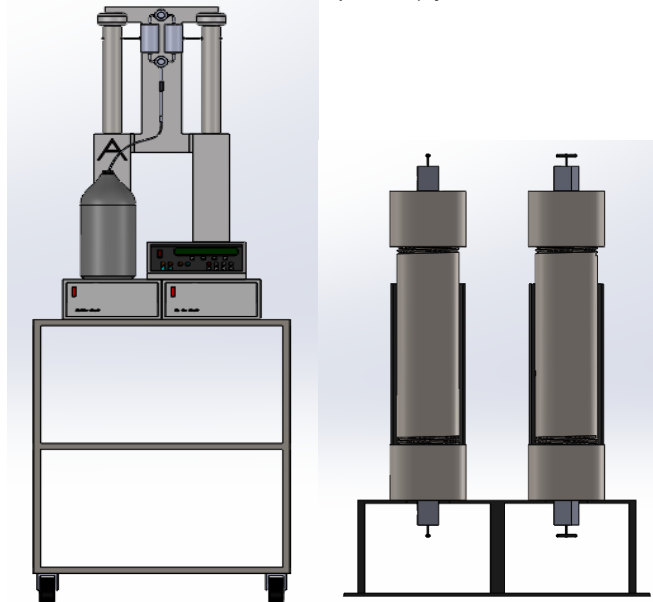
Las medidas del soporte de las electroválvulas, están especificadas en los anexos del documento.

#### 4.1.2.4 Sistema de inyección

La inyección de fluidos se hace por medio de una bomba de desplazamiento positivo marca ISCO, esta se encarga de impulsar los fluidos hacia los cilindros de almacenamiento ubicados dentro del horno, por medio de válvulas manuales el fluido es inyectado a la entrada del *Slim-Tube*, en la Figura 18 se presentan los equipos principales de este sistema.

La configuración de conexión de la bomba de inyección hasta los cilindros se deja a disposición de los analistas del Laboratorio, ya que depende del ensayo que se necesite realizar, así mismo de la conexión de los cilindros de almacenamiento hacia la entrada del *Slim-Tube*.

Figura 18 Bomba de desplazamiento positivo (izquierda) y cilindros de almacenamiento (derecha)

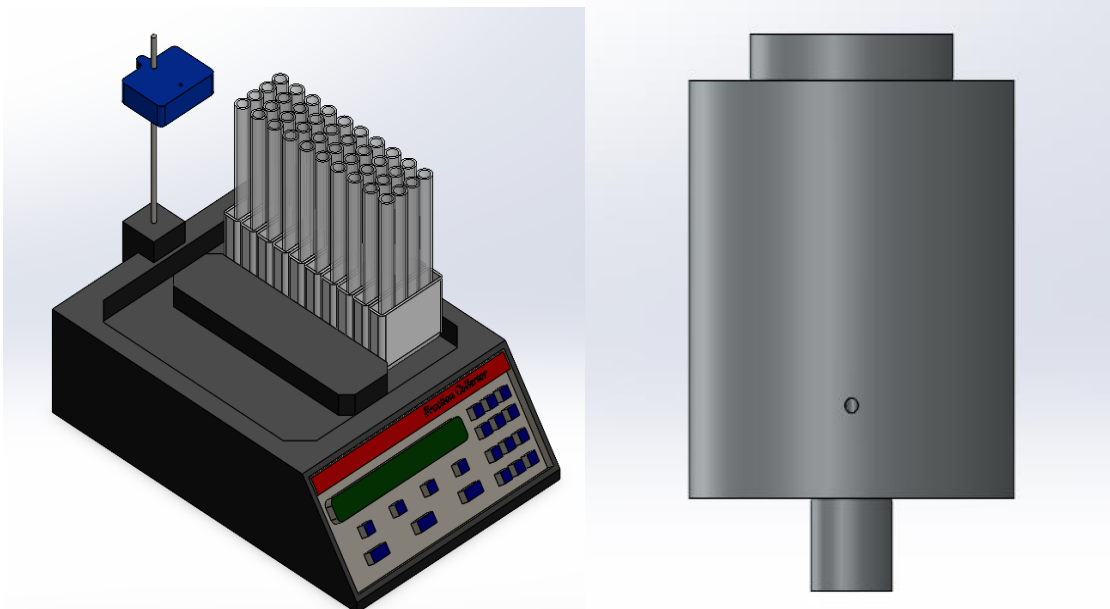


Fuente: Autor

#### 4.1.2.5 Sistema de recolección de efluente

El sistema de recolección del efluente se compone de un BackPressure marca Vinci, el cual está conectado a la salida del cuerpo del *Slim-Tube*, y el sistema de recolección del efluente, en la Figura 19 se presentan los componentes más importantes del sistema.

Figura 19 Recolección de efluente (izquierda), BackPressure Vinci (derecha)



Fuente: Autor

#### 4.1.2.6 Sistema de medición de presión diferencial

Este sistema está compuesto por 6 pares sensores de presión diferencial Smar, seis de ellos con rangos de operación desde -360 psi hasta 360 psi y los otros seis con rangos desde -3600 psi hasta 3600 psi. Cada pareja de sensores está conectado a una electroválvula que, por medio de un software de control, se encarga de proteger los sensores en caso de una sobre presión cerrándose e impidiendo que el fluido circule por ellos.

A su vez los sensores y las electroválvulas están montadas sobre una estructura de hierro, al momento de realizar este proyecto el Laboratorio contaba con una base hecha, la cual se puede apreciar en la Figura 20.

Figura 20 Base existente para ubicar los sensores de presión diferencial

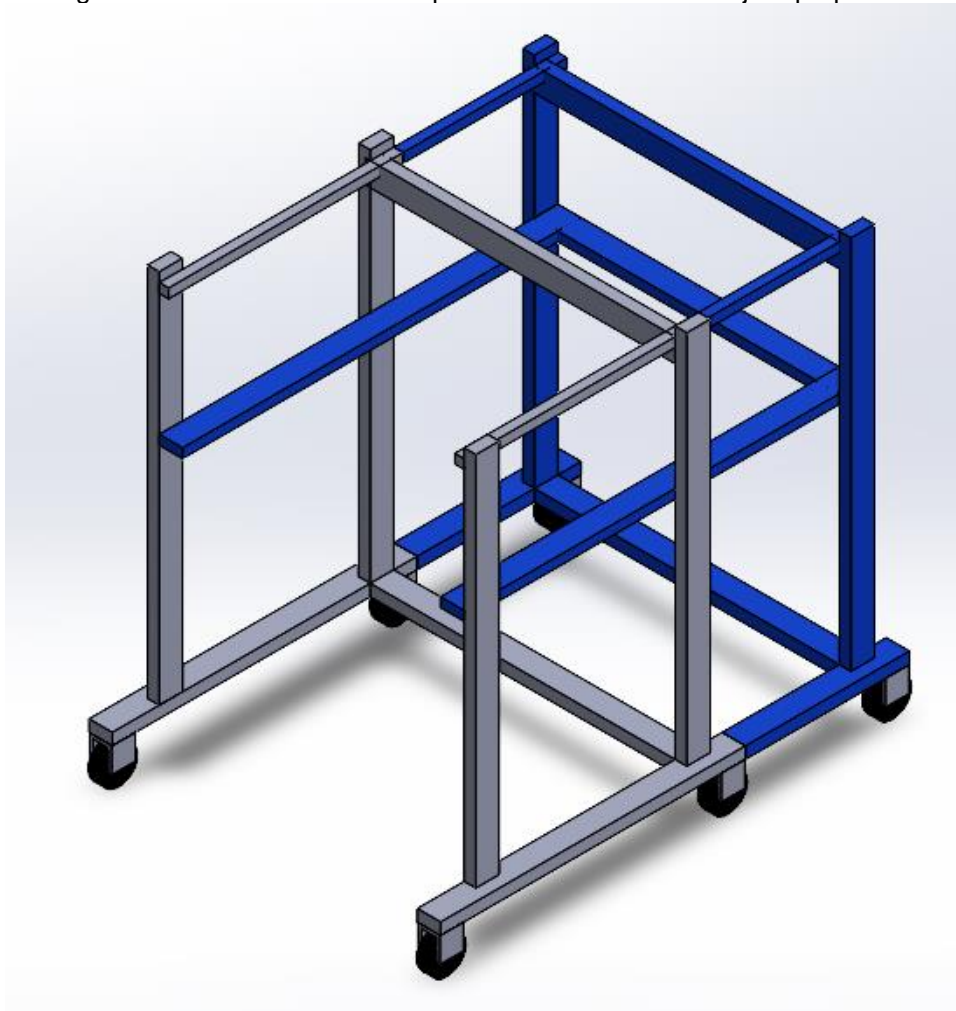


Fuente: Autor

Se propuso una manera practica de reutilizar la base existente en el Laboratorio, por medio de un diseño CAD se realizó adecuaciones al mismo, de forma que se pudieron instalar los 12 sensores Smar y las 6 electroválvulas, en la Figura 21 se aprecia la mejora

propuesta en color azul, las medidas de la base y su mejora se enuncian a más a detalle en un plano en la sección de anexos.

Figura 21 Base de sensores de presión diferencial con mejora propuesta.



Fuente: Autor

Así mismo se diseñó un ensamble donde se muestra la ubicación de los 12 sensores de presión Smar necesarios, las conexiones a cada punto de conexión con electroválvulas



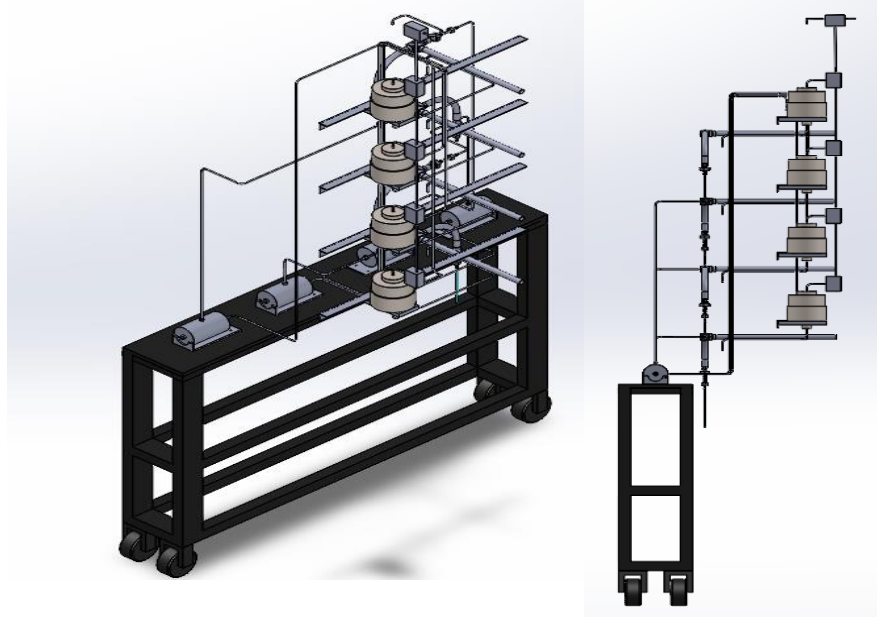
y directamente al *Slim-Tube*, en la sección de anexos se puede encontrar el plano a detalle.

#### 4.1.2.7 Sistema de contra presión (backpressure)

Este sistema permite la obtención de muestra del fluido inyectado al equipo, se necesitan que en los puntos de recolección se tenga un sistema de contra presión (*backpressure*), de esta forma no se producen despresurizaciones en el sistema, una falla que sería crítica para el desarrollo de cualquier ensayo.

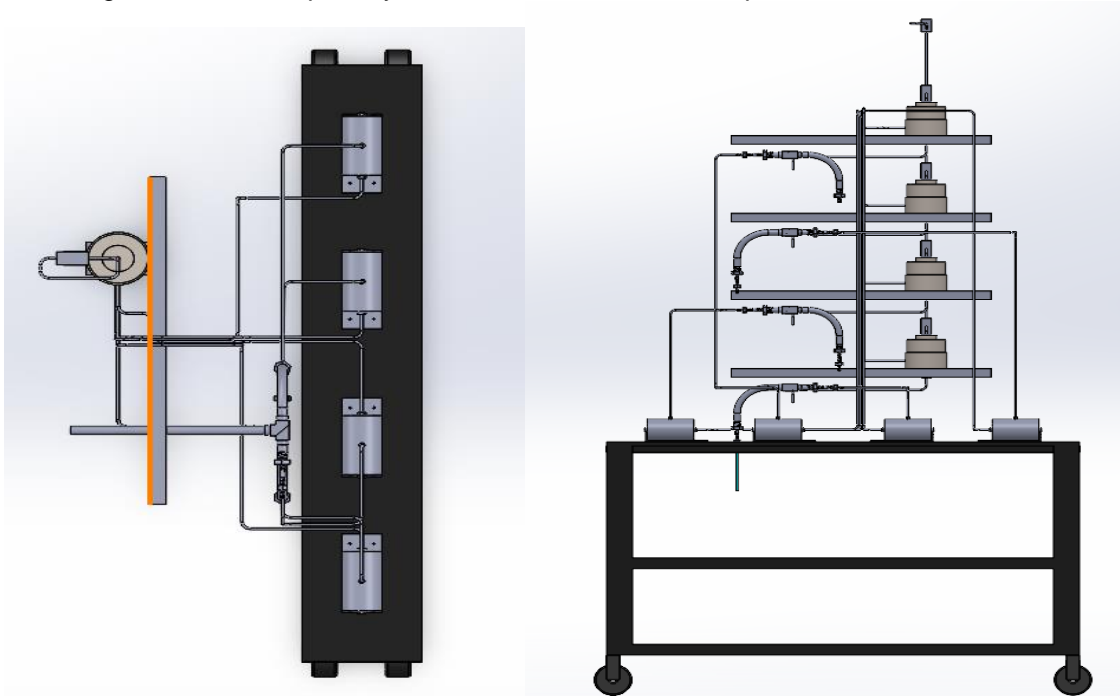
En la Figura 22 y Figura 23 se muestra las vistas del diseño de las conexiones de los puntos de toma de muestra.

Figura 22 Vistas isométricas y frontal del sistema de contra presión toma de muestras



Fuente: Autor

Figura 23 Vistas superior y lateral del sistema de contra presión toma de muestras



Fuente: Autor

#### 4.1.2.8 Sistema de control y monitoreo – HMI

Para finalizar, el sistema de control y monitoreo es el encargado de controlar todos los sensores, electroválvulas y otros accesorios presentes en el equipo Slim-Tube, por medio del software configurable, se pueden fijar diferentes parámetros de control para los ensayos que se deban realizar.

En la Figura 24 se representa una propuesta del sistema de control, de acuerdo al espacio disponible y los equipos necesarios.

Figura 24 Sistema de control y monitoreo del equipo Slim-Tube



Fuente: Autor.

En la sección de anexos, se encontrarán los planos de cada uno de los sistemas que componen el equipo *Slim-Tube*, en un nivel detallado, cabe destacar que esta

información está protegida por un acuerdo de confidencialidad y es de uso exclusivo de ECOPETROL S.A. por lo tanto, se prohíbe su reproducción total o parcial sin el previo consentimiento de Ecopetrol S.A.

**En el Anexo A** – Plano General del ensamble del equipo de medio Poroso de mayor longitud

**En el Anexo B** – Plano del *Slim-Tube* y su base

**En el Anexo C** – Plano del Horno DiEs

**En el Anexo D** – Plano de Base de Electroválvulas toma de muestra

**En el Anexo E** – Plano del sistema de contra presión y toma de muestras

**En el Anexo F** – Plano del sistema de inyección

**En el Anexo G** – Plano del sistema de recolección de efluente

**En el Anexo H** – Plano de configuración de sensores Smar

**En el Anexo I** – Plano de Base (modificada) de Sensores Smar

**En el Anexo J** – Plano del sistema de monitoreo y control

**4.1.3. *Etapas 2 Ejecución de montaje del equipo de medio poroso de mayor longitud.***

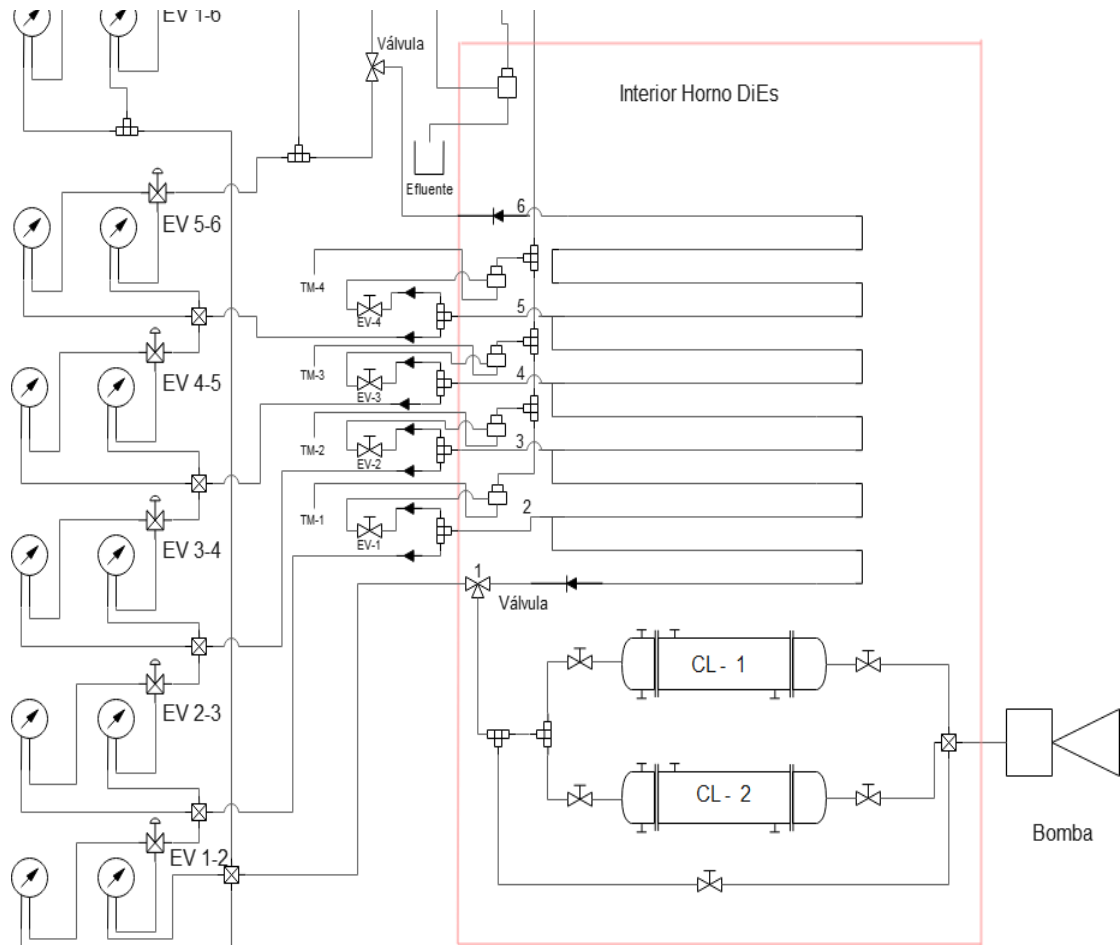
#### **4.1.3.1 Plan de ensamble equipo Slim Tube**

Existen variadas formas de abordar el procedimiento de ensamble de un equipo, es por esto que se desarrolló una guía sencilla de las actividades necesarias para realizar este procedimiento, de tal forma que demarquen un camino a seguir para llegar a ejecutar un ensamble del equipo ágil y correcto.

#### **4.1.3.2 Plano de conexiones para equipo Slim Tube**

Continuando con el proceso fué necesario contemplar el nuevo diseño que fue desarrollado, Diagrama P&ID del *Slim Tube* que se comparte en la Figura 25, el cual se elaboró gracias a la simulación simplificada del sistema en el programa FluidSIM Hidráulica, con este esquemático se puede ver las tuberías y componentes necesarios referentes al proceso llevado en el equipo, con esto se podrá evaluar el proceso de construcción y estimar apreciaciones en cuanto a costo, modificaciones y diseño de tuberías en general.

Figura 25 Diagrama P&ID Slim Tube



Fuente: Autor

#### 4.1.3.3 Orden de conexiones para ensamble equipo Slim Tube

Siguiendo un orden se realizaron las conexiones necesarias siempre teniendo en cuenta el diagrama ilustrado, para garantizar el adecuado sello entre los componentes en general de forma que se evite tener fugas en el futuro, con esto dicho, el orden fue el siguiente siempre siguiendo las indicaciones del fabricante se podrá hacer empalmes adecuados, podemos identificar en la Figura 26 de mejor forma cada componente.

1. Racor
2. Anillo anterior
3. Anillo posterior
4. Tuerca hexagonal
5. Tubing

Figura 26 Orden de instalación anillos racor



Fuente: (Racores para tubo con sistema doble anillo a compresión Megalok® :: Mecesa, s. f.)

Como parte final del proceso ensamble del equipo se marca el orden en tres pasos donde se hicieron los respectivos empalmes, siempre teniendo en cuenta la información anteriormente suministrada con esto el proceso de conexión de líneas estuvo guiado por la Figura 27.

Figura 27 Plan de conexiones

## ensamble equipo Slim Tube



Fuente: Autor



#### 4.1.3.4 Actividades de acondicionamiento equipo Slim Tube

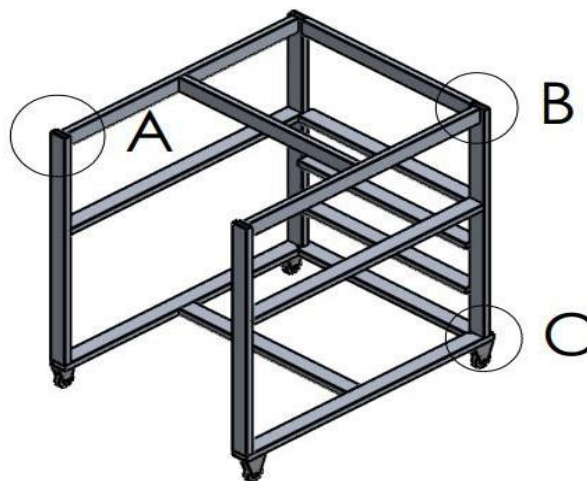
Como parte fundamental del trabajo propuesto se ejecutaron las labores de acondicionamiento del medio poroso de mayor longitud, donde se desarrollaron una serie de actividades que mostraron un evidente avance en las labores de adecuación. Con esto se logró el objetivo final de determinar de una forma experimental el desempeño de diversos procesos de recobro mejorado como inyección de fluidos para análisis.

#### 4.1.3.5 Adecuación soporte para sensores de presión diferencial

Siguiendo el plan de ensamble establecido, se analizó y encontró que la mejor solución para el estante de los sensores Smar y electroválvulas Vindum consistió en diseñar un nuevo estante donde se ubicaron el total de los necesarios, de esta manera y mediante el software de diseño *Solidworks*, se realizó la siguiente propuesta compartida en la Figura 28.

Fuente: Autor

Con este diseño ya establecido y verificado, se dio el paso siguiente que fue la elaboración física del Figura 28 Soporte sensores de presión diferencial



elemento teniendo como resultado un estante estructuralmente sólido y adecuado para la carga que soportará, como se muestra en la Figura 29.

Figura 29 Soporte en físico para sensores y electroválvulas

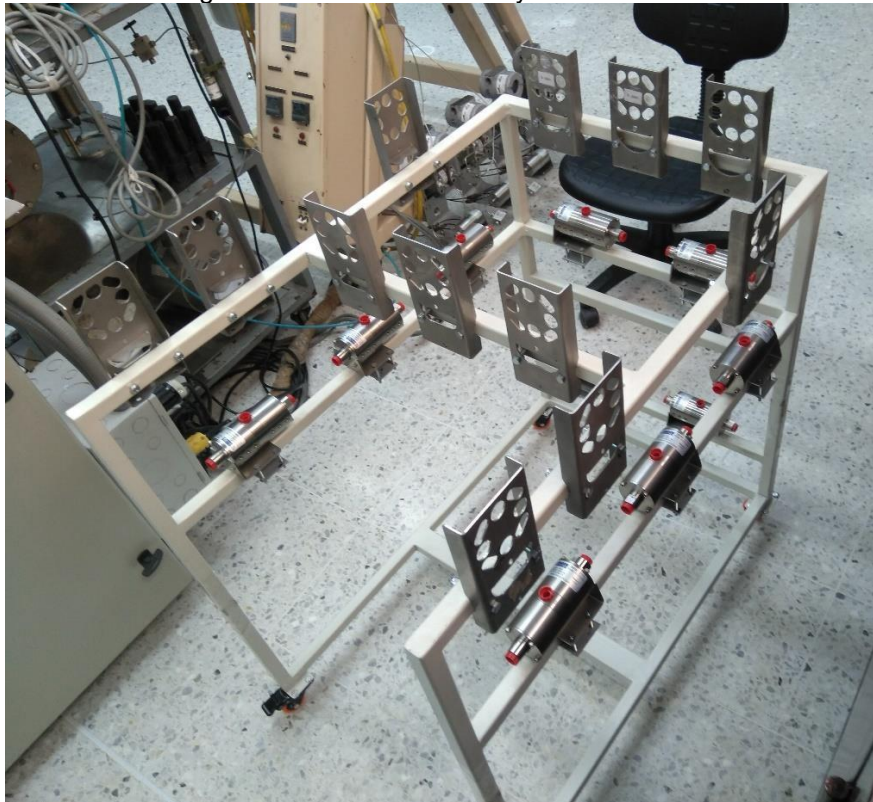


Fuente: Autor

#### 4.1.3.6 Instalación de elementos en la base.

Ya teniendo la base física en el laboratorio de recobro mejorado se realizaron las tareas de adecuación, iniciando con la ubicación de las láminas que soportan los Smar y posteriormente las electroválvulas usando la tornillería necesaria como se muestra en la Figura 30.

Figura 30 Base con láminas y electroválvulas



Fuente: Autor

Luego de tener todos estos elementos adecuadamente instalados, se procedió con la ubicación de los sensores de presión diferencial Smar, donde se usaron doce sensores de los cuales diez son totalmente nuevos y dos ya habían sido usados anteriormente, y en cuanto a rango de medición se cuenta con seis de -360 a 360 PSI y seis con un rango de -3600 a 3600 PSI. Finalizado el trabajo de ubicación de sensores en sus respectivos lugares, el resultado se puede visualizar en la Figura 31.

Figura 31 Sensores ubicados en soportes



Fuente: Autor



#### 4.1.3.7 Adecuación de líneas tubing

Con todos los elementos adecuadamente sujetos en el estante se había dado inicio a la adecuación de líneas, teniendo como primer paso la identificación de las medidas de tubería correctas para su implementación, encontrando que por la medida manejada por las electroválvulas Vindum se debían adecuar líneas de un cuarto de pulgada.

Figura 32 Adecuación de líneas de tubing



Fuente: Autor

Como se puede observar en la Figura 32, se inició con la adecuación de las líneas de un cuarto de pulgada conectando cruces, tees, sensores de presión diferencial y electroválvulas, evidenciando un buen avance respecto a las actividades de acondicionamiento del equipo poroso de mayor longitud.

#### 4.1.4. Actividades realizadas en el COHORTE 3.

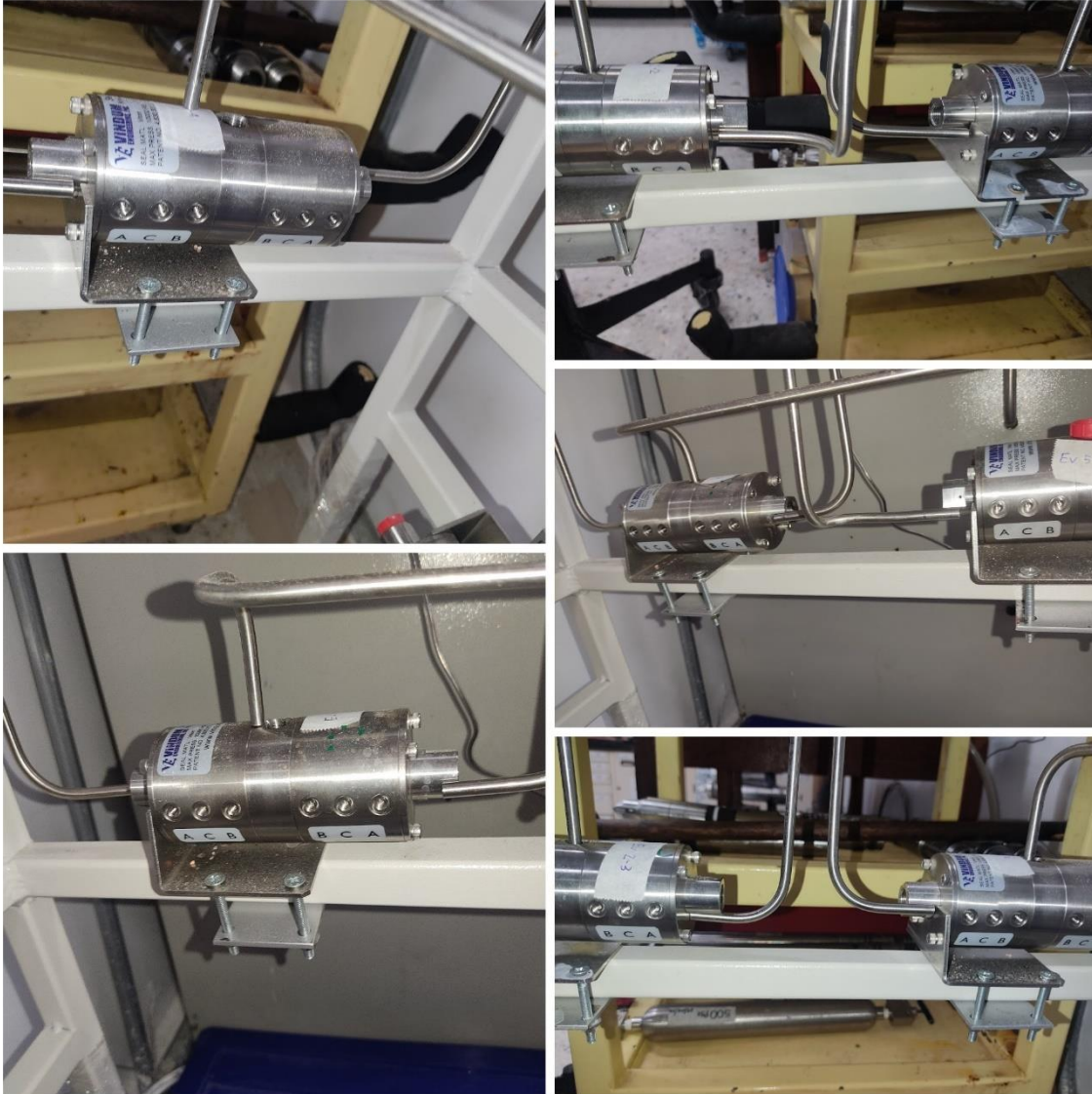
Se retomaron las actividades pendientes de los COHORTES anteriores relacionadas al montaje del slim tube, comenzando con las conexiones entre los smar y las electroválvulas.

Figura 33 Electroválvulas por conectar



Fuente: Autor

Figura 34 Electroválvulas sin acoplar

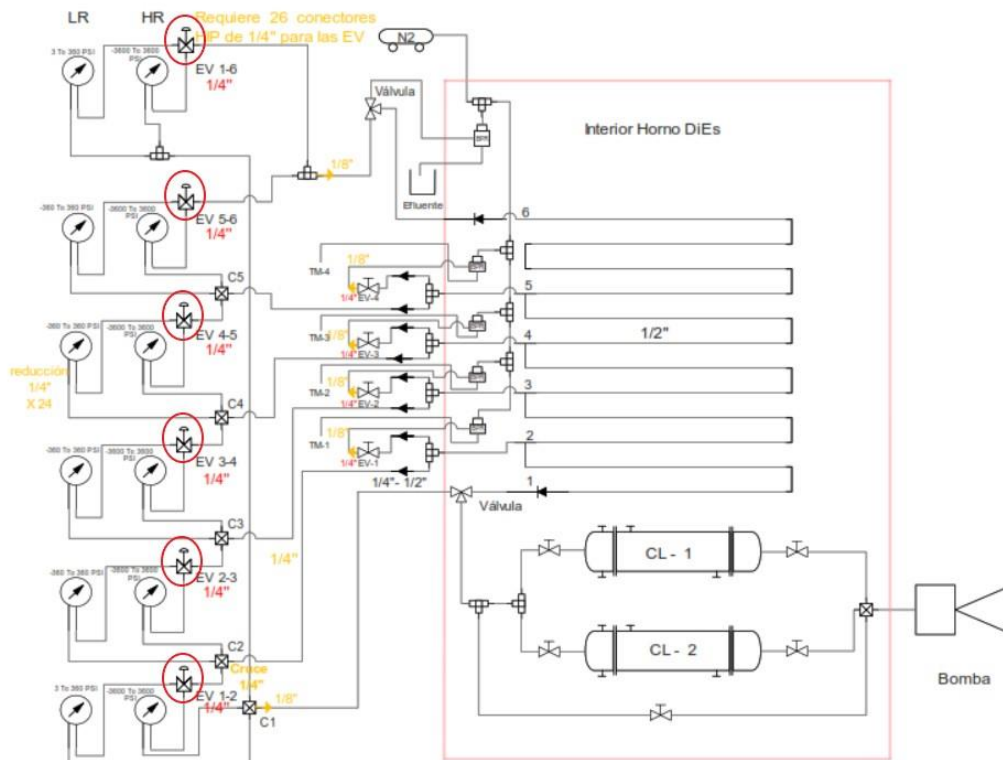


Fuente: Autor



Con la ayuda de la representación gráfica del circuito hidráulico de la Figura 35, se identificó la ubicación y el orden de las conexiones de los tubings con sus respectivas electroválvulas.

Figura 35 Identificación electroválvulas en el sistema hidráulico



Fuente: Autor



Los tubings que vienen de los Smart se acoplan a las electroválvulas utilizando conectores tipo autoclave de 1/4 de pulgada como el de la Figura 36.

Figura 36 Ajuste acople de electroválvulas con conectores tipo autoclave



Fuente: Autor

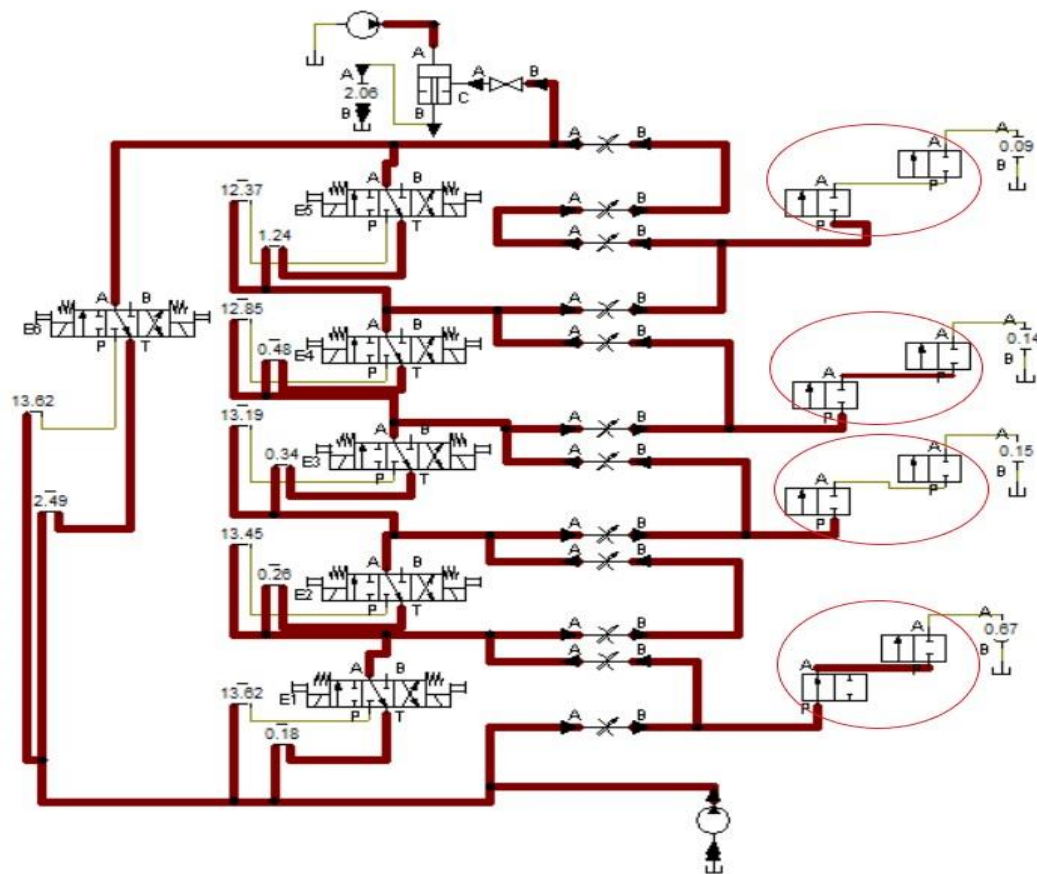
Figura 37 Electroválvulas acopladas



Fuente: Autor

Debido a que el sistema del backpressure que se iba a implementar para la toma de muestras está en proceso de compra y se desconoce el tiempo que se demore, se hizo el requerimiento de sustituirlo temporalmente por un sistema de válvulas accionadas manualmente, este cambio no afecta el funcionamiento del circuito hidráulico del slim tube, se simula de nuevo en el programa fluidsims esta vez reemplazando las electroválvulas que simulaban el backpressure por unas válvulas 3 vías de accionamiento manual y el funcionamiento en el simulador sigue siendo optimo.

Figura 38 Simulación sistema hidráulico con modificación de las válvulas



Fuente: Autor

Figura 39 montaje válvulas 3 vías para la toma de muestras



Fuente: Autor



A las 4 válvulas manuales de dos vías se le acoplan unas válvulas cheque las cuales simulan el papel del backpressure donde el fluido debe superar una determinada presión para poder pasar por la válvula y así llegar a los recipientes donde se recogen las muestras.

Figura 40 Montaje válvulas cheque para toma de muestras



Fuente: Autor

Posteriormente se acoplan a los conectores tipo T unos segmentos de tubing de 1/4 de pulgada con reducción a 1/8 de pulgada para unir el sistema de medición al slim tube.

Figura 41 anexo de segmentos de tubing para conexión con el sistema de medición



Fuente: Autor

Es importante comentar que se decidió hacer las reducciones a 1/8 de pulgada debido a que el tubing de 1/8 se deja manipular de una forma más sencilla y cómoda.

Figura 42 Reducción de tubería de 1/4 a 1/8



Fuente: Autor

Se conectó La cruz 1 a la válvula 3 vías ubicada dentro del horno, la cual conecta la alimentación de la bomba, el slim tube y el sistema de medición.

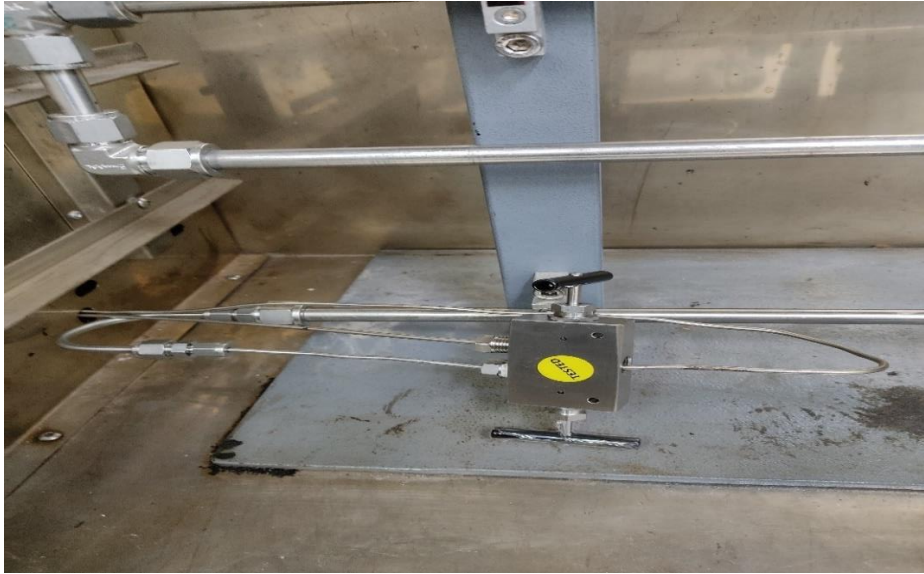
Figura 43 conexión Cruz 1



Fuente: Autor



Figura 44 Conexión cruz 1, bomba y slim tube



Fuente: Autor

Adicionalmente, se cortó y se quitó un segmento de tubería de 1/2 pulgada el cual lo habían ubicado en un punto donde se determinó que no debería medirse.

Figura 45 Tubería omitida por diseño



Fuente: Autor

Después de haber conectado las uniones de cruces, se procede a conectar la unión tipo T que va a las electroválvulas 5-6 y las electroválvulas 1-6 (las cuales se aprecian en la figura Figura 47) con la válvula de 3 vías que comunica el backpressure de la toma de muestra final y el slim tube.

Figura 46 Conexión electroválvulas con válvula 3 vías



Fuente: Autor

Figura 47 Unión entre las electroválvulas 1-6 y 5-6.

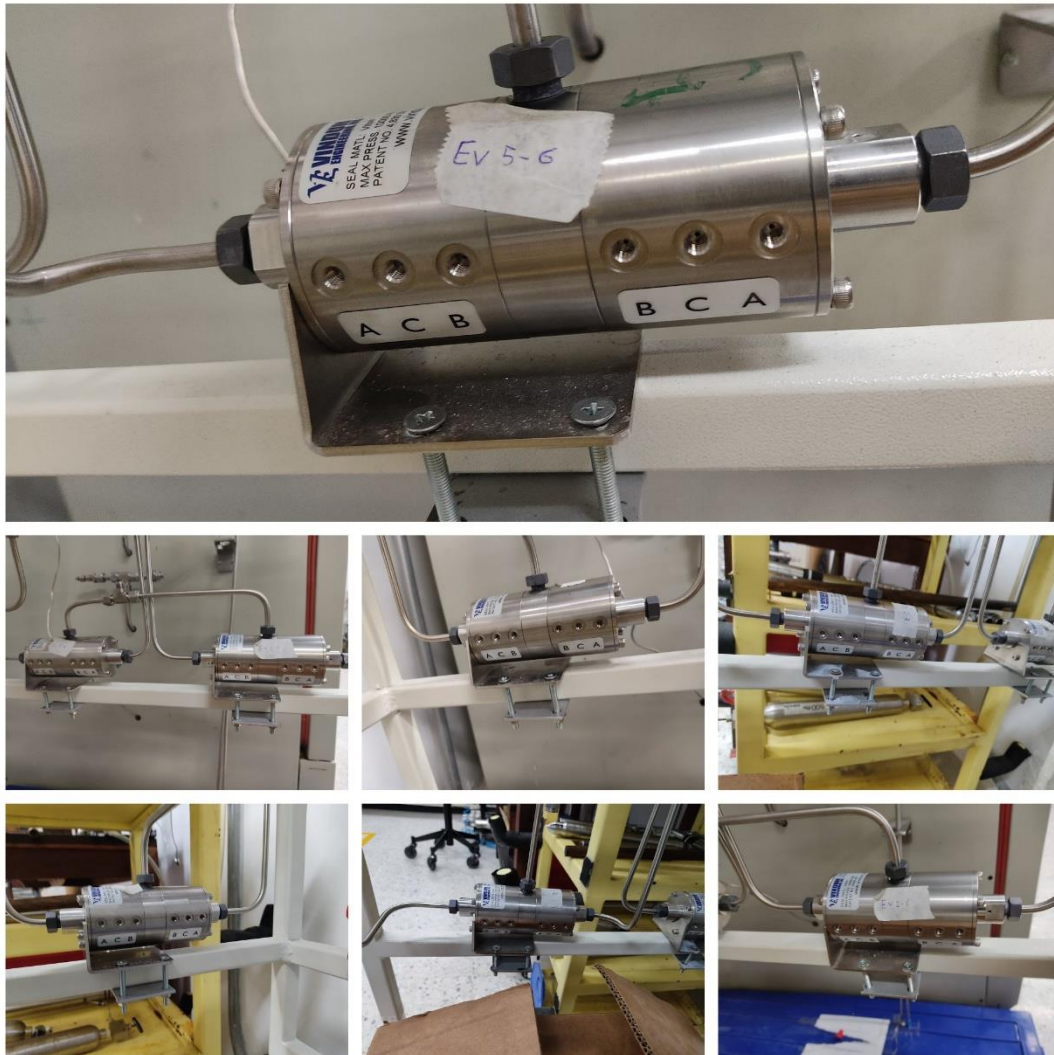


Fuente: Autor



Es importante comentar que se dejó una marcación con cinta en cada electroválvula como se aprecia en la Figura 48 con la finalidad de distinguir las electroválvulas de los distintos puntos de análisis de presión.

Figura 48 Electroválvulas con su respectiva marcación.

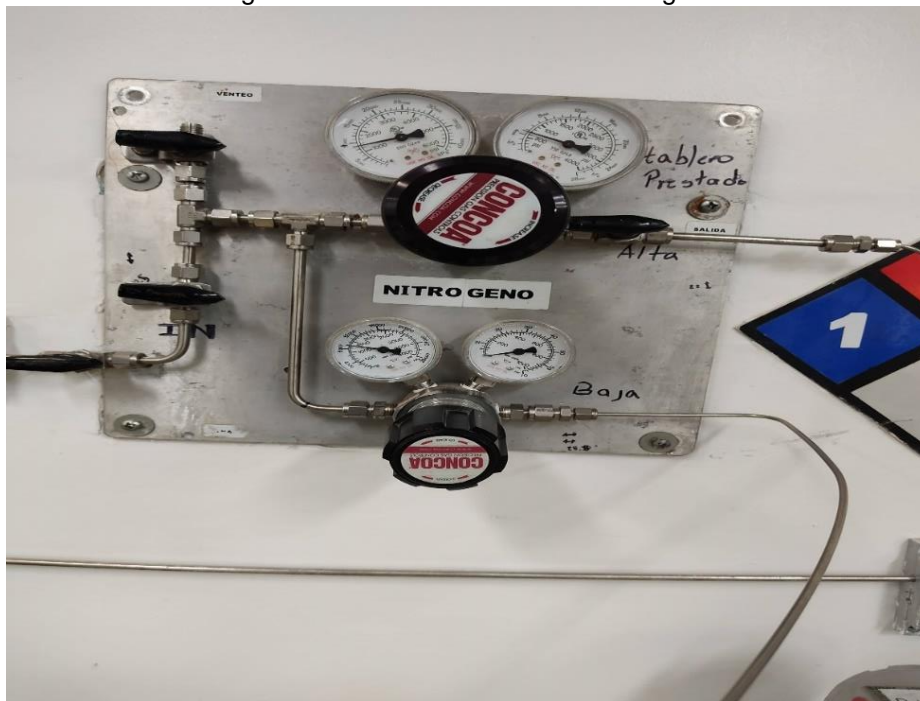


Fuente: Autor

Al finalizar esta conexión se concluye que el circuito hidráulico del equipo slim tube quedó como un sistema cerrado. Vale la pena aclarar que el sistema del backpressure se instalará una vez concluya el proceso de compra.

Se procedió a realizar prueba de fugas en el sistema cerrado de medición, la prueba se realizó saturando el sistema con nitrógeno a presión y luego cerrando las válvulas, se aplicó una mezcla de agua-jabón sobre ubicaciones donde posiblemente se encuentren puntos de fuga como en las conexiones tipo T, en los cruces y en los acoples reductores, el método consistía en si al aplicar la mezcla se creaban burbujas en ese punto se determinaba que existía una fuga y que se debía ajustar mejor esa conexión de tuberías.

Figura 49 Punto alimentación de nitrógeno



Fuente: Autor  
Figura 50 Mezcla agua-jabón



Fuente: Autor

Figura 51 Aplicación mezcla agua-jabón para buscar fugas en puntos claves

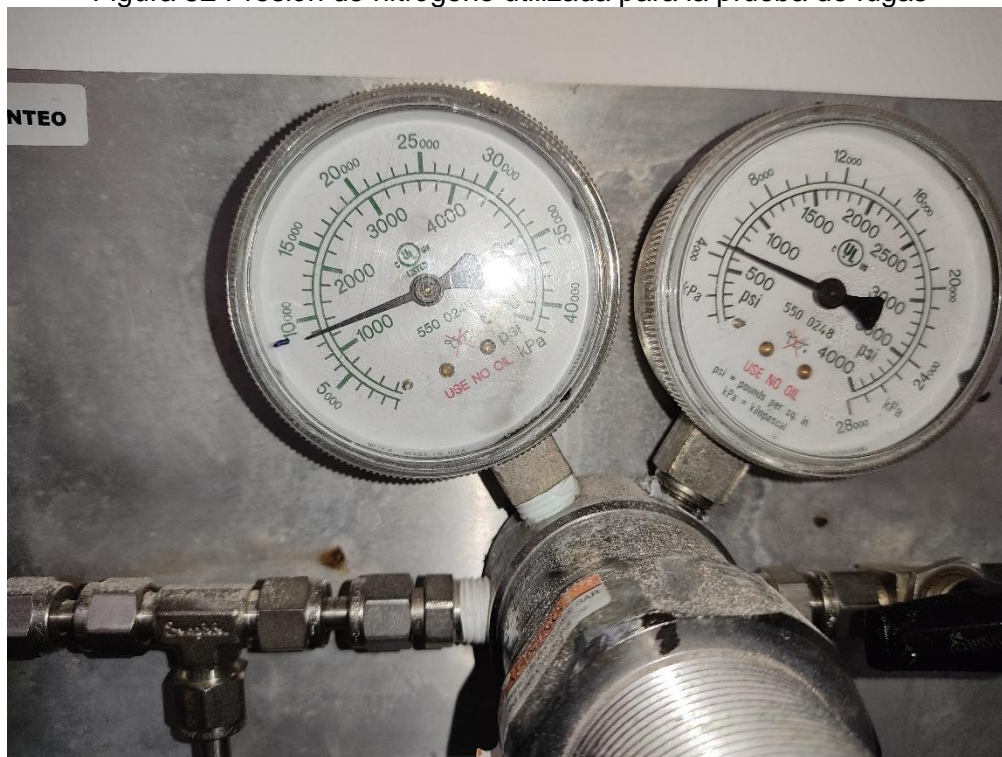


Fuente: Autor



Se realizaron varias pruebas de fugas con nitrógeno debido a que al saturarse el sistema y cerrar las válvulas se apreciaba en el manómetro que caía la presión y con ayuda de la mezcla de agua-jabón se pudieron ubicar y solucionar los puntos donde se encontraban las fugas, después de solucionados esos puntos de fuga, se realizó una prueba final donde se dejó el sistema saturado con una presión aproximada de 1300 psi durante dos horas, después de transcurrido este tiempo se pudo apreciar que la presión se mantuvo constante y que no cayo, concluyendo así que el sistema de medición quedo plenamente cerrado sin presencia de fugas.

Figura 52 Presión de nitrógeno utilizada para la prueba de fugas



Fuente: Autor



Se desmontaron los equipos Smar 1,2,3 y 4 debido a que se iban a calibrar por parte del grupo de mantenimiento del ICP, esta calibración duró aproximadamente 7 días, una vez que llegaron estos equipos se volvieron a montar en el sistema y después se desmontaron los otros Smar que faltaban por realizarse la calibración de estos. Una vez calibrados los Smar restantes se procedió a volver a instalarse en las mismas posiciones en las que estaban, dejando ya todos los Smar del equipo calibrados.

Figura 53 Equipos Smar 1,2,3 y 4 con sus respectivos acoples



Fuente: Autor

Figura 54 Equipos Smar calibrados

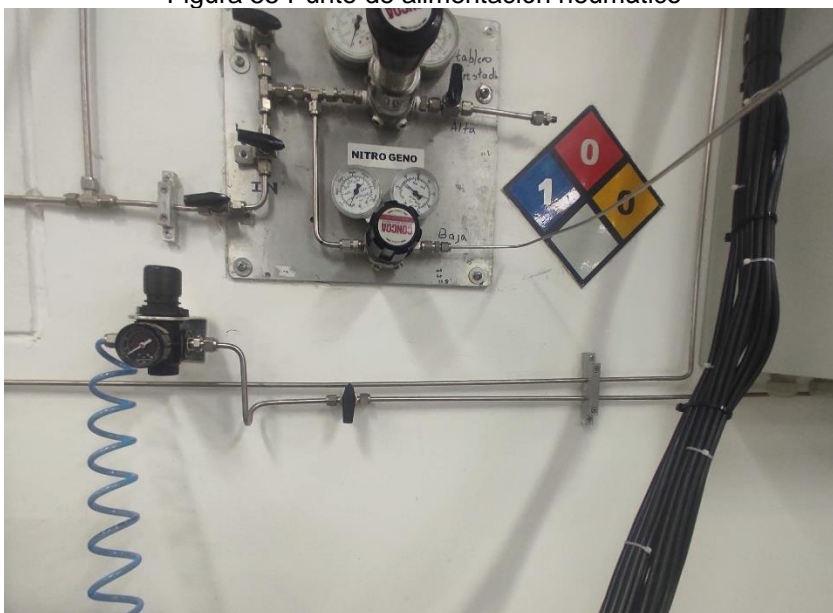


Fuente: Autor

El montaje del equipo finaliza y se realiza por parte del grupo de mantenimiento la definición y programación de la estrategia para que el equipo quede automatizado.

Una de las actividades realizadas por el personal de mantenimiento es la instalación del punto de alimentación neumática para el funcionamiento de las electroválvulas como se muestra en la Figura 55.

Figura 55 Punto de alimentación neumático

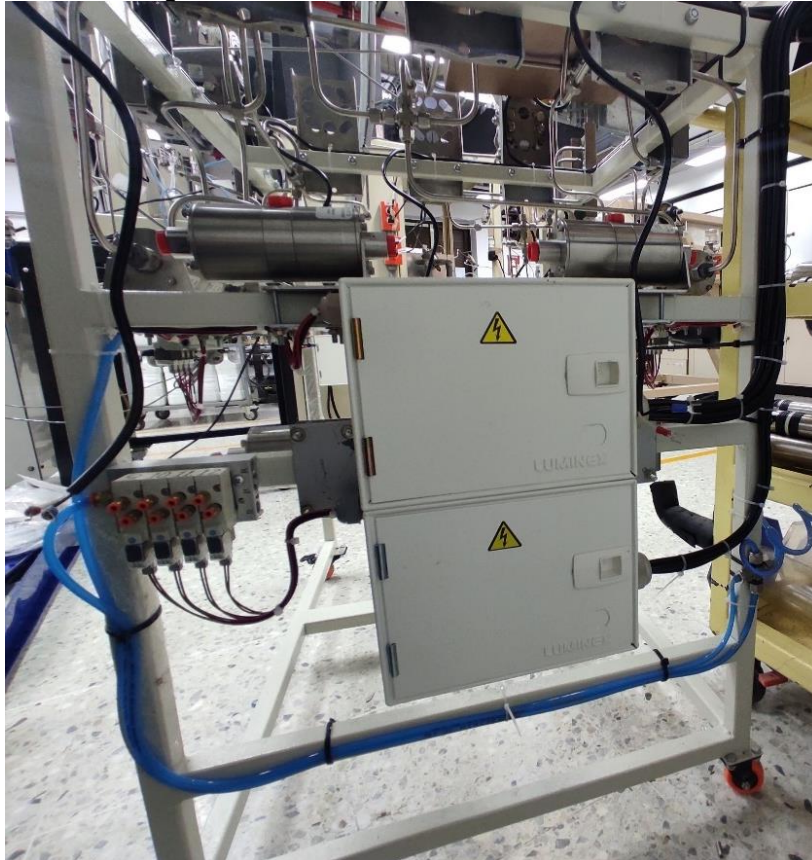


Fuente: Autor



Como se observa en la Figura 56 también realizaron las conexiones de las manguerillas entre las electroválvulas y los puntos de manifold donde se controla el flujo del aire seco.

Figura 56 Conexión de elementos neumáticos



Fuente: Autor

El personal de mantenimiento realizó labores para la instalación del sistema de alimentación eléctrico del equipo slim tube.

Figura 57 Instalación del sistema eléctrico del Slim tube



Fuente: Autor

El punto de alimentación eléctrica para los elementos del slim tube se toma del tablero eléctrico UPS del laboratorio de química de producción que se muestra en la Figura 58 , punto al cual llega un voltaje de 220 V monofásico trifilar (dos fases y neutro).

Figura 58 Tablero UPS del laboratorio de química de producción

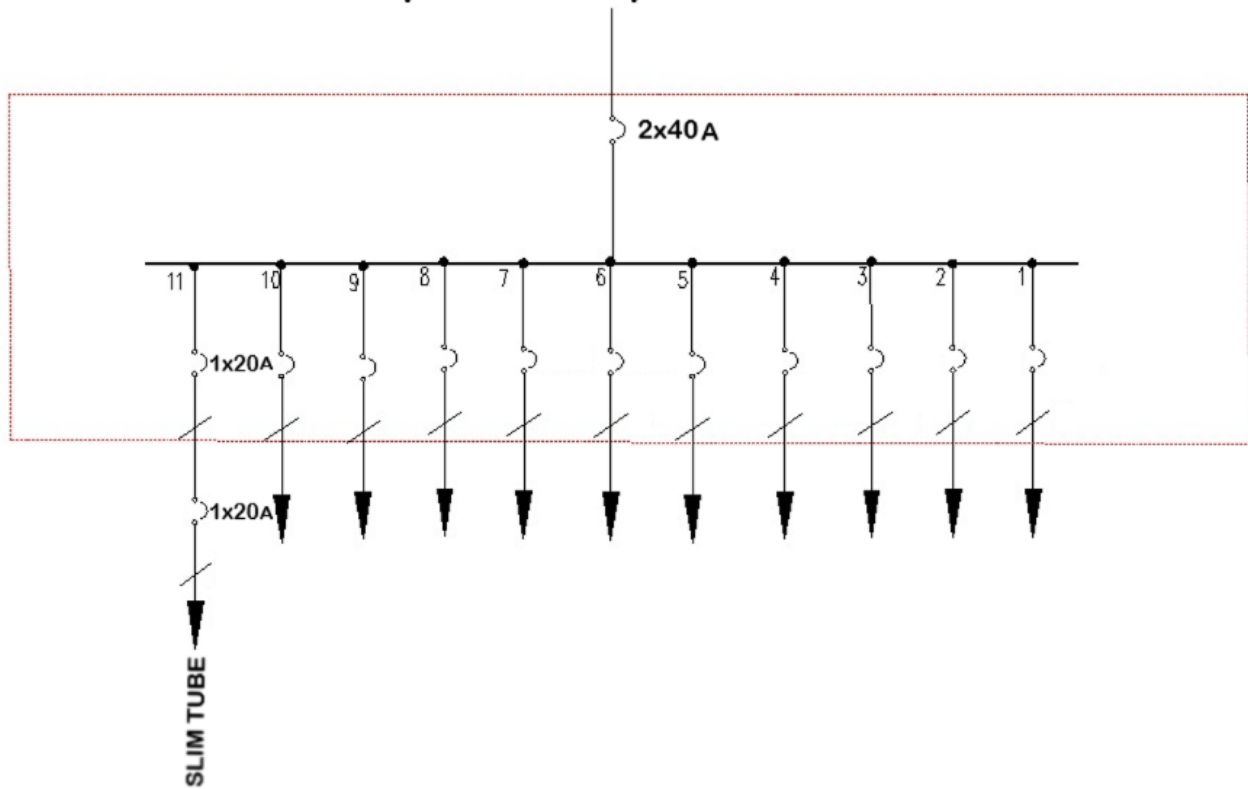


Fuente: Autor

En el siguiente diagrama unifilar que se puede detallar en la Figura 59, se representa la conexión de las protecciones termomagnéticas del circuito eléctrico que alimenta al equipo slim tube.

Figura 59 Diagrama unifilar Tablero UPS

### Tablero UPS laboratorio química de producción



Fuente: Autor

Este tablero cuenta con una protección principal de un breaker de 40 A marca Merlin Gerin mostrado en la Figura 60.

Figura 60 Protección general del tablero de distribución

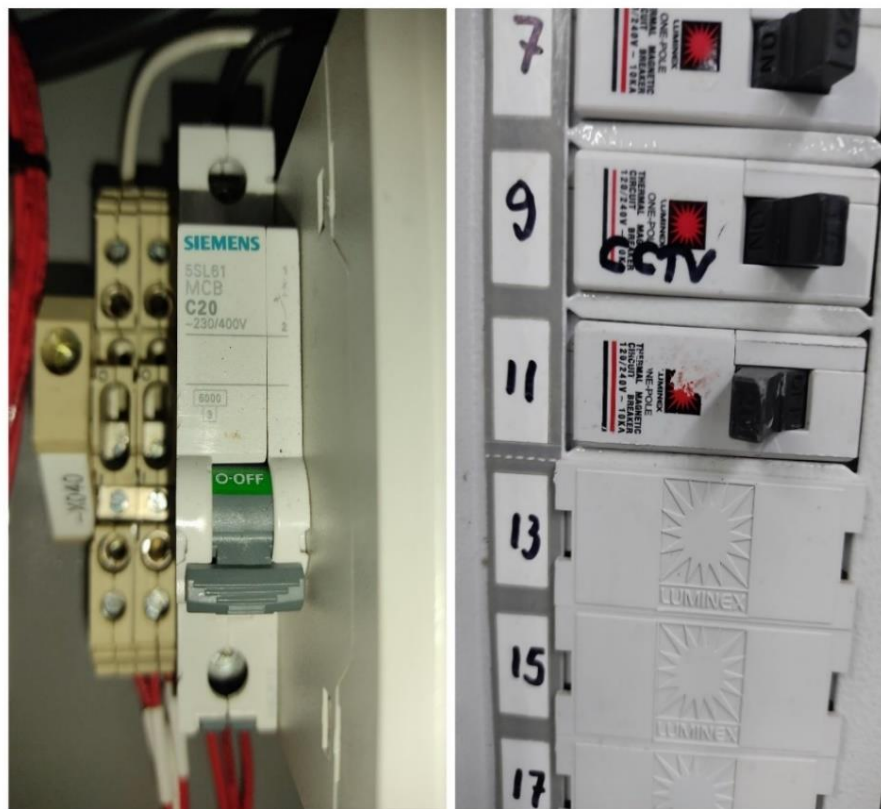


Fuente: Autor



De este tablero se deriva un punto de alimentación monofásico bifilar (una fase y neutro) a un voltaje de 110 V con la protección de un taco de 20 A (taco #11), debido a que el tablero principal se encuentra a una distancia considerable, se implementa en el tablero de control del Slim tube una protección adicional también de 20 A.

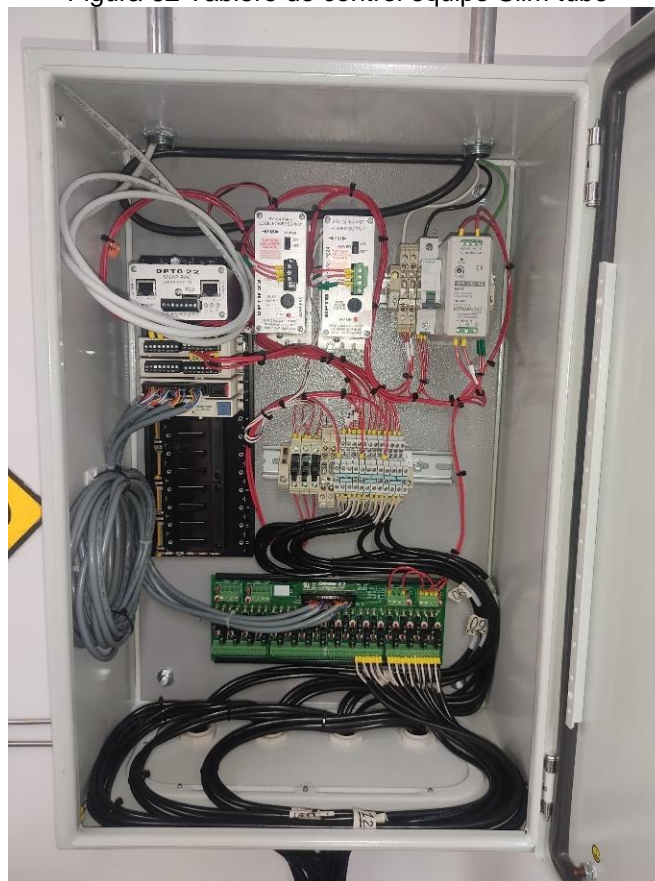
Figura 61 Mini breakers de protección auxiliar



Fuente: Autor

Después de realizar el cableado de la alimentación, el equipo de mantenimiento realizó la instalación del tablero de control del equipo Slim tube, en donde se puede apreciar en la Figura 62 los elementos de protección eléctrica y los componentes del sistema Opto 22, sistema encargado de controlar los procesos de funcionamiento del slim tube.

Figura 62 Tablero de control equipo Slim tube



Fuente: Autor

Figura 63 Mini breaker de 20 A para protección del tablero de control



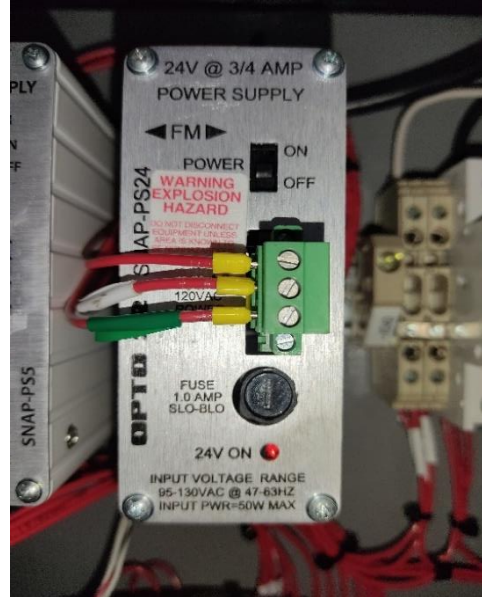
Fuente: Autor

Figura 64 Fuente de alimentación de las electroválvulas



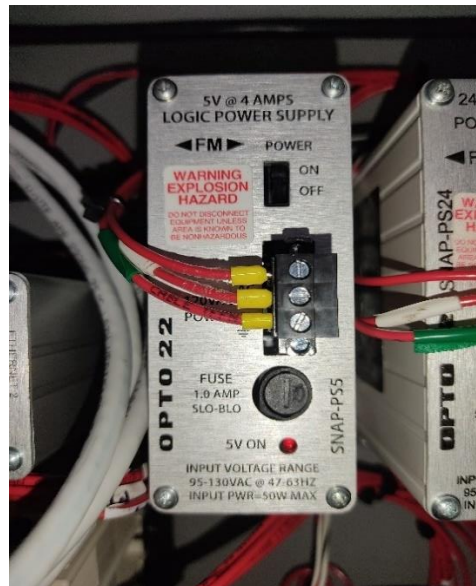
Fuente: Autor

Figura 65 Fuente de alimentación de los transmisores inteligentes de presión Smar



Fuente: Autor

Figura 66 Fuente de alimentación sistema OPTO



Fuente: Autor

Figura 67 Elementos de lectura de presión y temperatura



Fuente: Autor

Figura 68 Tarjeta de control





Fuente: Autor

Respecto a la instalación de los parámetros eléctricos por parte de mantenimiento, las labores se finalizaron.

Figura 69 Circuito eléctrico general del Slim tube



Fuente: Autor

#### **4.1.5. Etapa 3 Pruebas de verificación en condiciones características de yacimiento.**

Se realizan pruebas de verificación del equipo slim tube, se realizó esta prueba en un tramo corto de tubería de 34,4 cm saturado de arena Ottawa, este tramo que se analiza recibe el nombre de sand pack, vale la pena mencionar que la arena con la que se satura el sand pack es extraída directamente desde los yacimientos que se buscan simular en las pruebas de laboratorio. El montaje de la muestra se realiza de acuerdo al instructivo técnico T&I-I-160 de Ecopetrol.

Para saturar la tubería en uno de los extremos se recubre con una malla mesh metálica que recubra el diámetro de salida de la tubería e impida la fuga de la arena empaquetada como se muestra en la Figura 70.

Figura 70 Recubrimiento de los diámetros con la malla mesh





Fuente: Autor

Después se pesa el tramo de tubería vacío para comparar el peso de la tubería cuando esté totalmente saturado de arena, esto con el fin de conocer la cantidad de masa con la cual se satura la tubería. El peso del tramo de tubería vacío es de 213.97 gramos fuerza como se observa en la Figura 71.

Figura 71 Peso inicial tramo sin empaquetar



Fuente: Autor

Como se muestra en la Figura 72 se procede a saturar el tramo de tubería a analizar con la arena Ottawa utilizando el método original: 1 cm de longitud de arena, vibración y compactación manual.

Figura 72 Proceso de empaquetamiento



Fuente: Autor

Al finalizar el llenado, se procede a pesar el sand pack.

Figura 73 Peso final tramo empaquetado



Fuente: Autor

Se añaden los datos de los parámetros de la arena empaquetada en tablas de excel para organizar la información analizada.

Tabla 8 Condiciones generales de la muestra

| CONDICIONES GENERALES |        |                 |
|-----------------------|--------|-----------------|
| Propiedad             | Valor  | Unidad          |
| Radio efectivo        | 0,5105 | cm              |
| Área transversal      | 0,819  | cm <sup>2</sup> |
| Longitud 1            | 34,4   | cm              |
| Volumen total         | 28,17  | mL              |
| Densidad arena        | 2,64   | g/mL            |
| Masa conectores       | 0      | g               |

Fuente: Autor

Tabla 9 Parámetros del empaquetamiento

| Empaquetamiento Sand Pack #1 |
|------------------------------|
|------------------------------|

| <b>Propiedad</b> | <b>Valor</b> | <b>Unidad</b> |
|------------------|--------------|---------------|
| Masa inicial     | 213,97       | g             |
| Masa final       | 271,78       | g             |
| Masa cargada     | 57,81        | g             |
| VP               | 6,27         | mL            |
| Porosidad        | 0,22         | fracción      |

Fuente: Autor

Los datos obtenidos en el empaquetamiento son utilizados para los cálculos de las permeabilidades que se establecen para las pruebas a desarrollar.

Se realizó el circuito de prueba, este circuito se divide en dos partes, la parte que representa el empaquetado donde se ubica la arena que se va a analizar, en este caso es el sand pack y la otra parte consta del sistema de medición de diferencial de presión el cual está compuesto por el Smar, en la tubería que conecta el sand pack a las válvulas 3 vías pasa el fluido a analizar ya sea salmuera o crudo y en la tubería que conecta el Smar a las válvulas tres vías está saturada por aceite mineral.

El aceite mineral es inyectado al circuito utilizando la bomba manual de marca ENERPAC como se muestra en la Figura 74.

Figura 74 Inyección de aceite mineral con bomba manual Enerpac



Fuente: Autor

Una vez saturado el smar y las líneas de medición se conectan a las válvulas 3 vías, las cuales conectan en el circuito el sand pack y la bomba de desplazamiento positiva que se puede apreciar en la Figura 75 esta bomba funciona con dos pistones que inyectan el líquido que se requiere analizar permitiendo manipular el caudal inyectado en un rango entre 0 y 50 ml/min.

Figura 75 Bomba de inyección Teledyne Isco

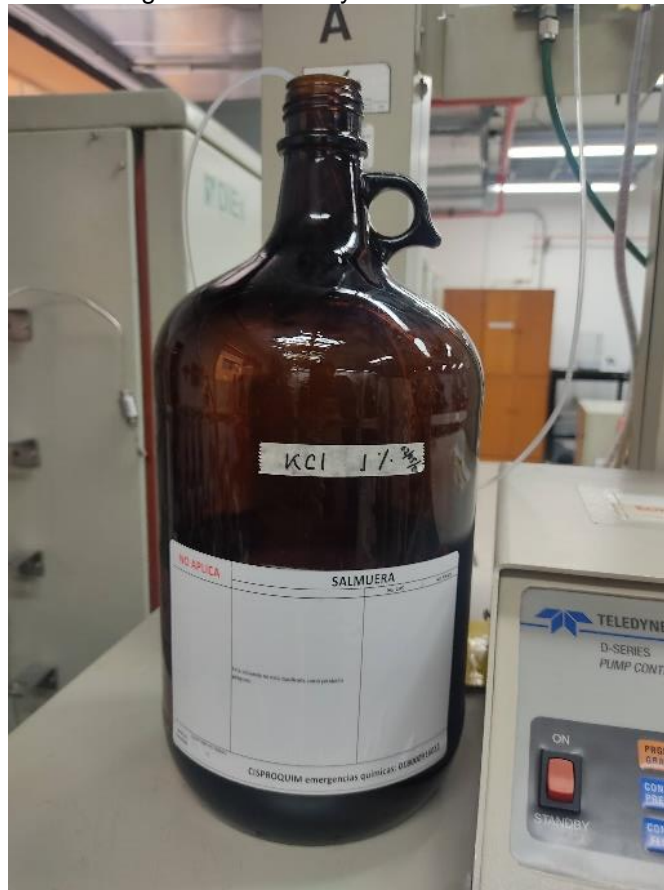


Fuente: Autor

Para el caso de las pruebas de verificación se inyecta KCL al 1% (en la preparación de la salmuera en 1 litro de agua hay 10 g de cloruro de potasio) mostrado en la Figura 76.



Figura 76 Fluido inyectado KCL al 1%



Fuente: Autor

Las propiedades fisicoquímicas del fluido inyectado KCl al 1% se pueden apreciar en la siguiente tabla:



Tabla 10 Características fisicoquímicas del KCl 1%

| Caracterización fisicoquímica básica KCl 1% |                          |          |             |                  |        |          |
|---|--------------------------|----------|-------------|------------------|--------|----------|
| Característica                              | Ph                       | Tds      | Cond        | Viscosidad @Tamb | %sal   | Resis    |
| valor                                       | <a href="#">63@ 21°C</a> | 9,99 g/l | 17,66 mS/cm | 1 cp             | 10 ppT | 0,057 KΩ |

Fuente: Autor

En la Figura 77 se muestra en color rojo la trayectoria que realiza la salmuera desde el momento en que es inyectada por la bomba, después atraviesa el sand pack y al vencer la presión establecida en el back pressure de aproximadamente 500 psi comienza a fluir al recipiente de toma de muestras, de color naranja se observan las líneas saturadas de aceite mineral, el cual al ser presionadas por el paso de la salmuera marca una presión tanto de entrada como de salida, del cual el diferencial de estas dos presiones es mostrado en el panel o display del Smar, y finalmente la línea de color azul representa el paso del nitrógeno hacia el back pressure, este nitrógeno ejerce una presión continua para controlar el paso de la salmuera a la toma de muestras.

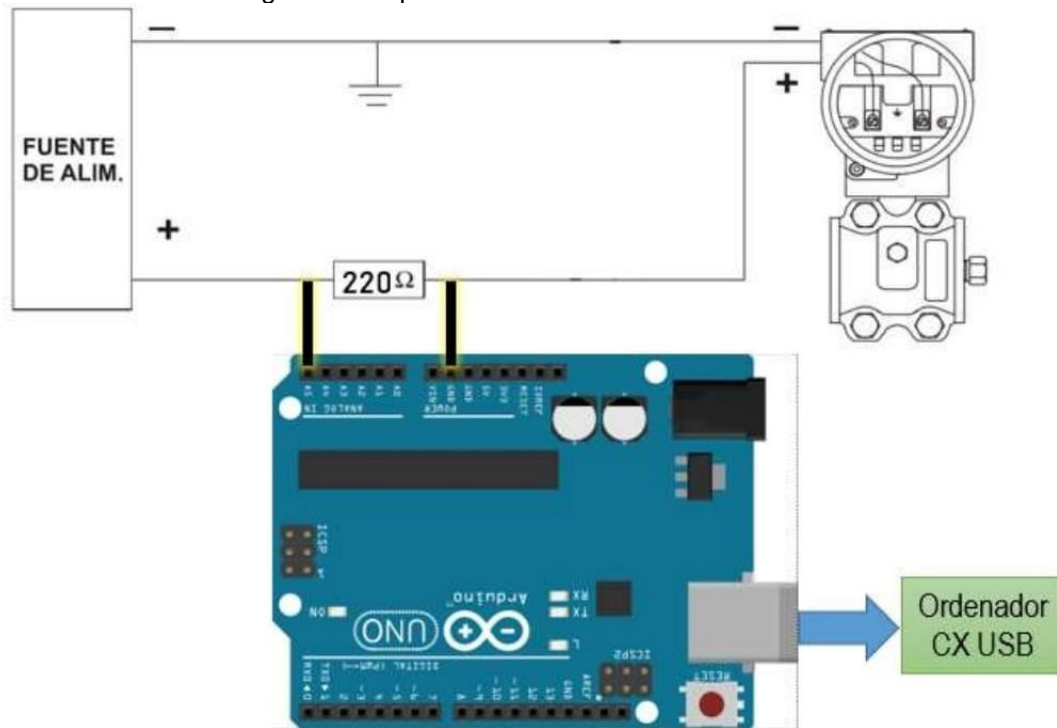
Figura 77 Circuito de prueba



Fuente: Autor

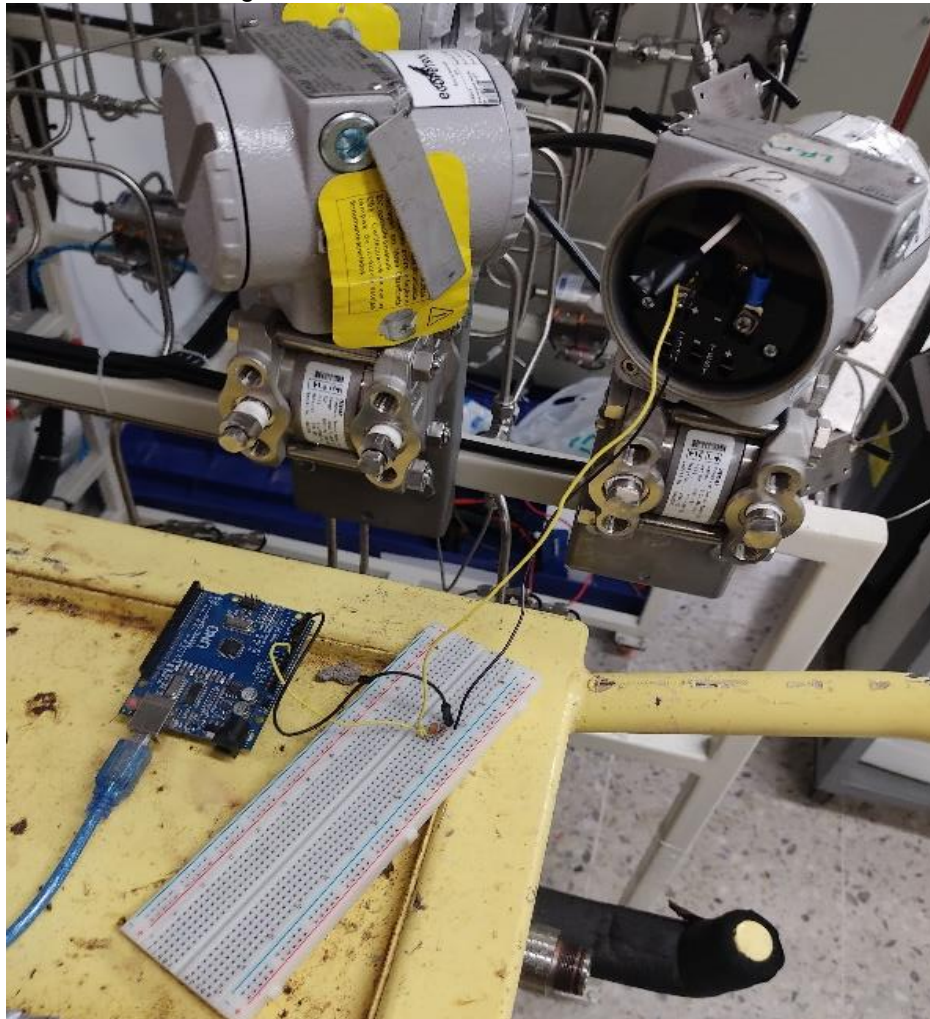
Como solución alternativa se realizó una prueba en el Smar #1 recopilando la información de las presiones medidas tanto en el sistema opto 22 propio del equipo slim tube como en un sistema alternativo el cual es el Arduino, se programa en el Arduino a través de la aplicación LabVIEW para convertir las señales de voltaje enviadas por el Smar al sensor una determinada presión en un valor numérico que represente la presión registrada, los resultados de esta prueba alternativa se pueden apreciar en la gráfica de la figura .

Figura 78 Esquema conexión eléctrica Smar-Arduino



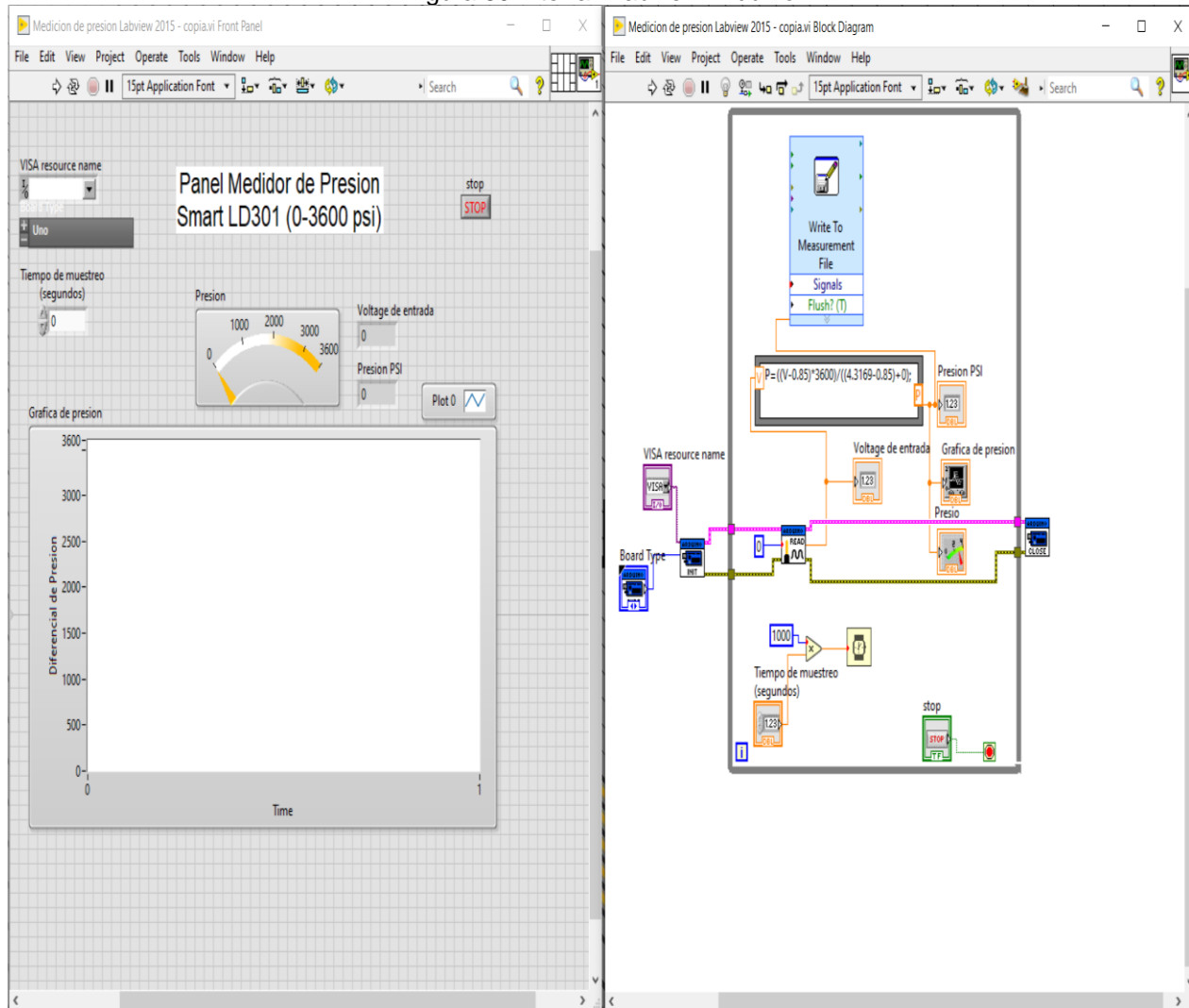
Fuente: Autor

Figura 79 Conexión eléctrica Smar-Arduino



Fuente: Autor

Figura 80 Interfaz Labview-Arduino



Fuente: Autor

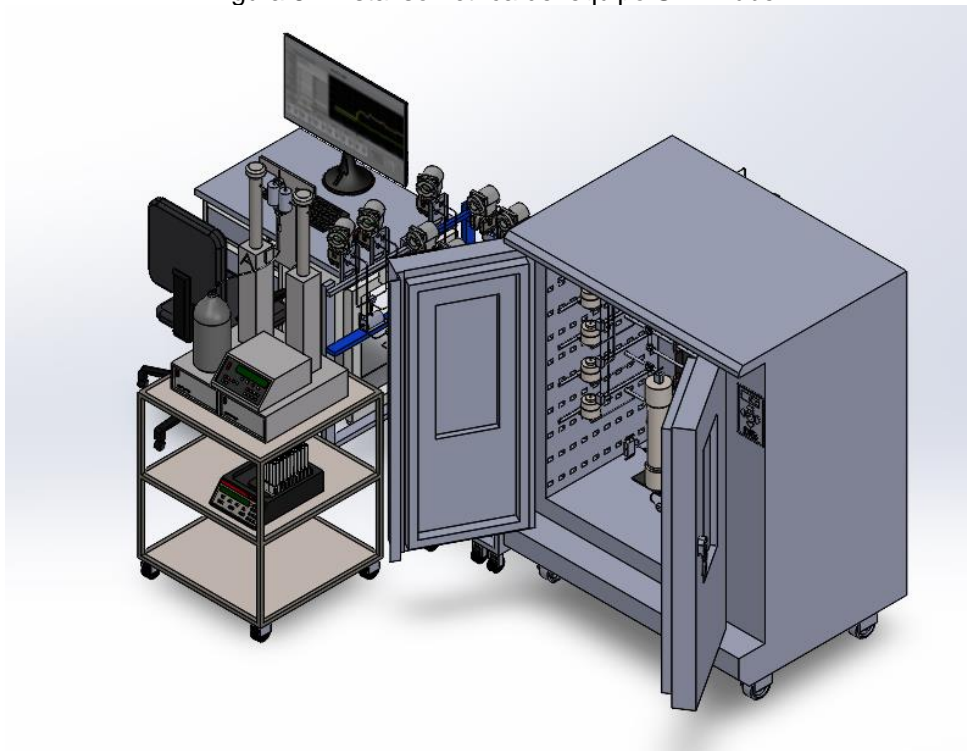
## 5. RESULTADOS

### 5.1. Entregable 1

Diseño general del equipo de medio poroso de mayor longitud realizado en el programa de diseño CAD SolidWorks, anexando cada una de las piezas y ensamblajes del equipo.

En la Figura 81 se pueden apreciar las vistas isométricas, superior y lateral del equipo *Slim-Tube*.

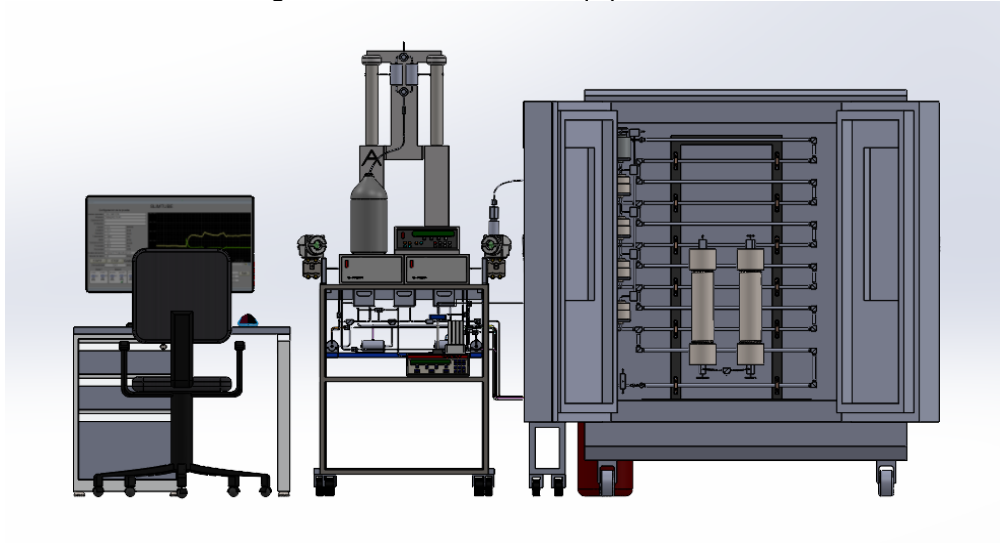
Figura 81 Vista isométrica del equipo Slim-Tube



Fuente: Autor

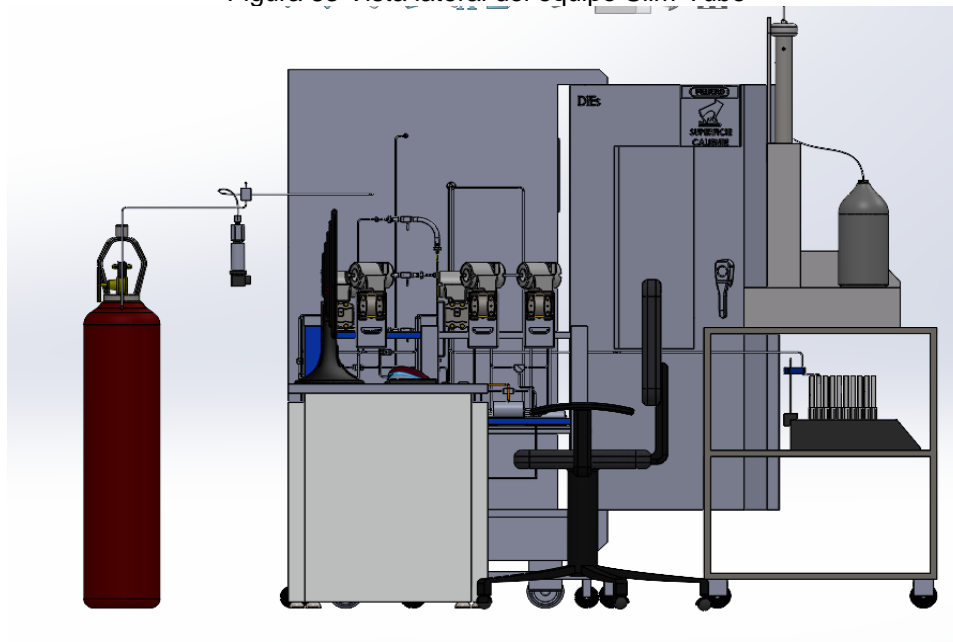


Figura 82 Vista frontal del equipo Slim-Tube



Fuente: Autor

Figura 83 Vista lateral del equipo Slim-Tube

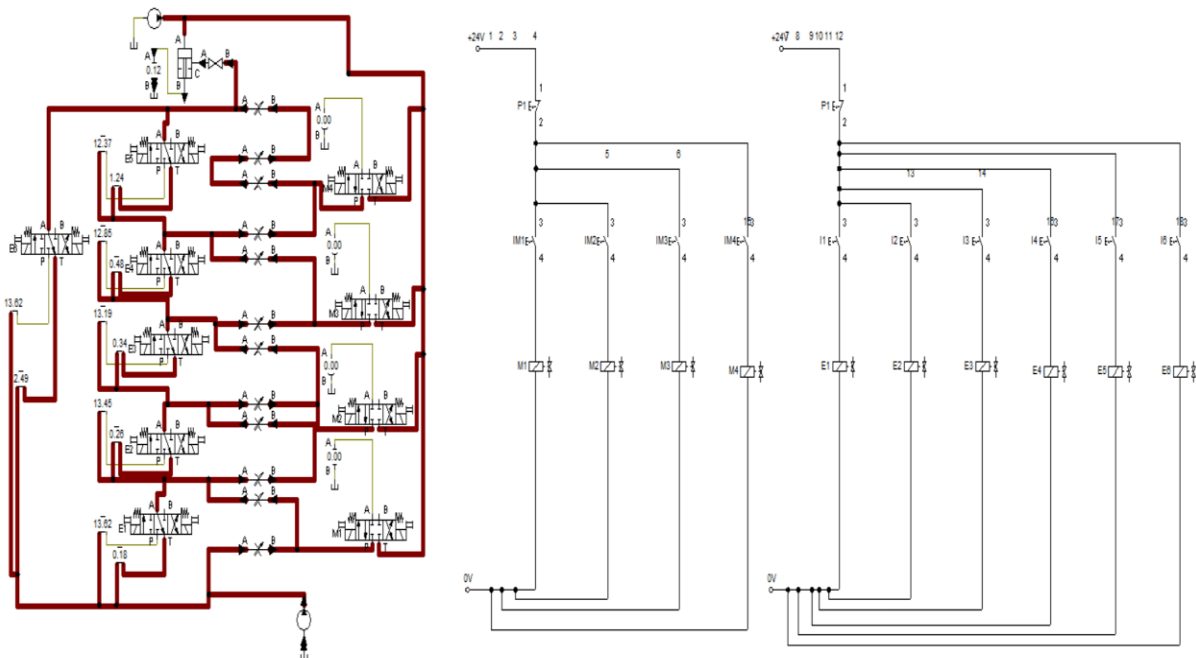


Fuente: Autor

## 5.2. Entregable 2

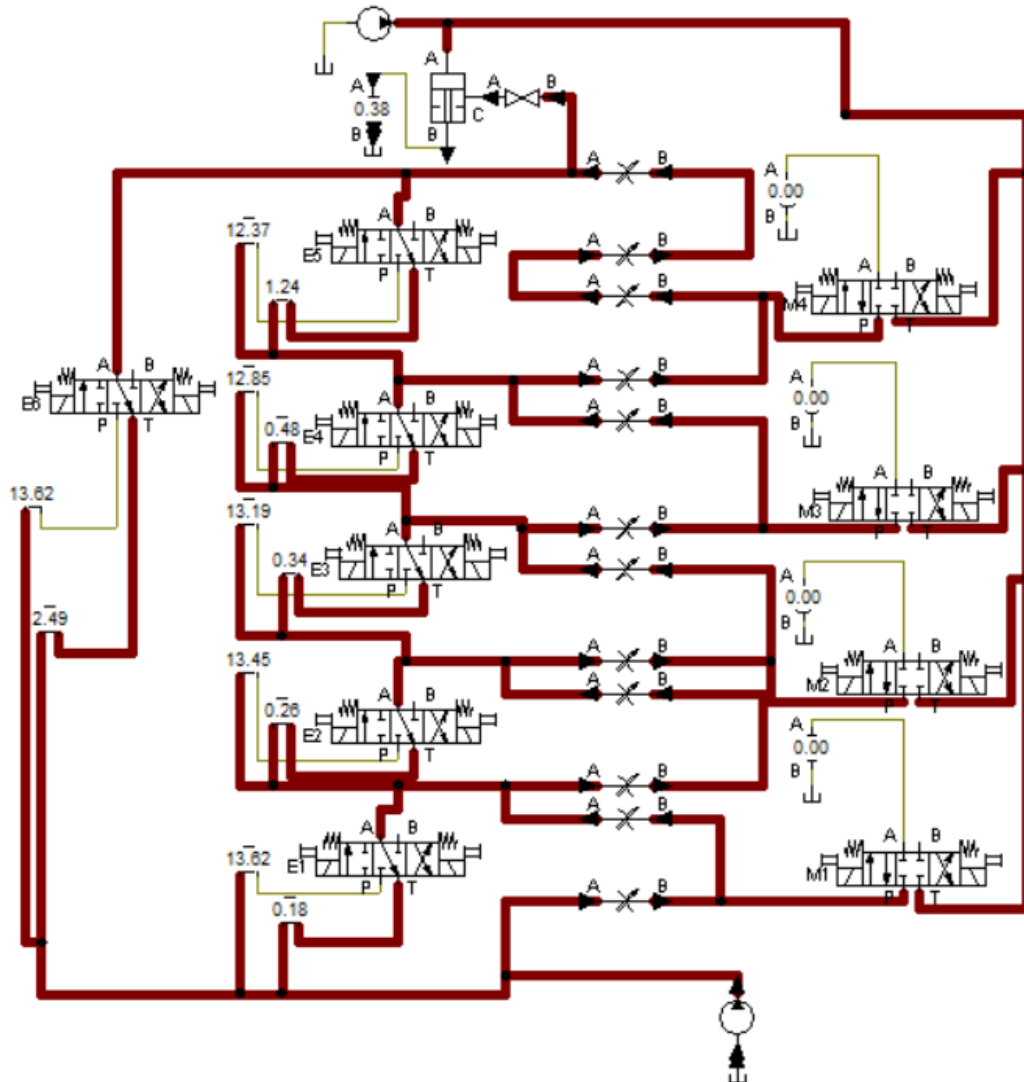
El Diseño y simulación general del circuito hidráulico y eléctrico del equipo de medio poroso de mayor longitud realizado en el programa de diseño y simulación fluidsim. A este diseño final se le realizan modificaciones y mejoras para simular de una forma más clara y real el circuito del equipo en fluidsim, reemplazando las válvulas 3 vías (ver Figura 13) por unas válvulas solenoides de 3 vías ajustándose mejor al diseño original y realizando a su vez el diseño del circuito eléctrico que controla las válvulas solenoides, la ventaja de esta simulación es que permite emular como al modificar algún parámetro del circuito eléctrico como el accionar una válvula solenoide puede afectar en tiempo real las medidas de presión en el sistema, permitiendo predecir las condiciones de operación y funcionamiento del equipo slim tube.

Figura 84 Simulación hidráulica y eléctrica del slim tube



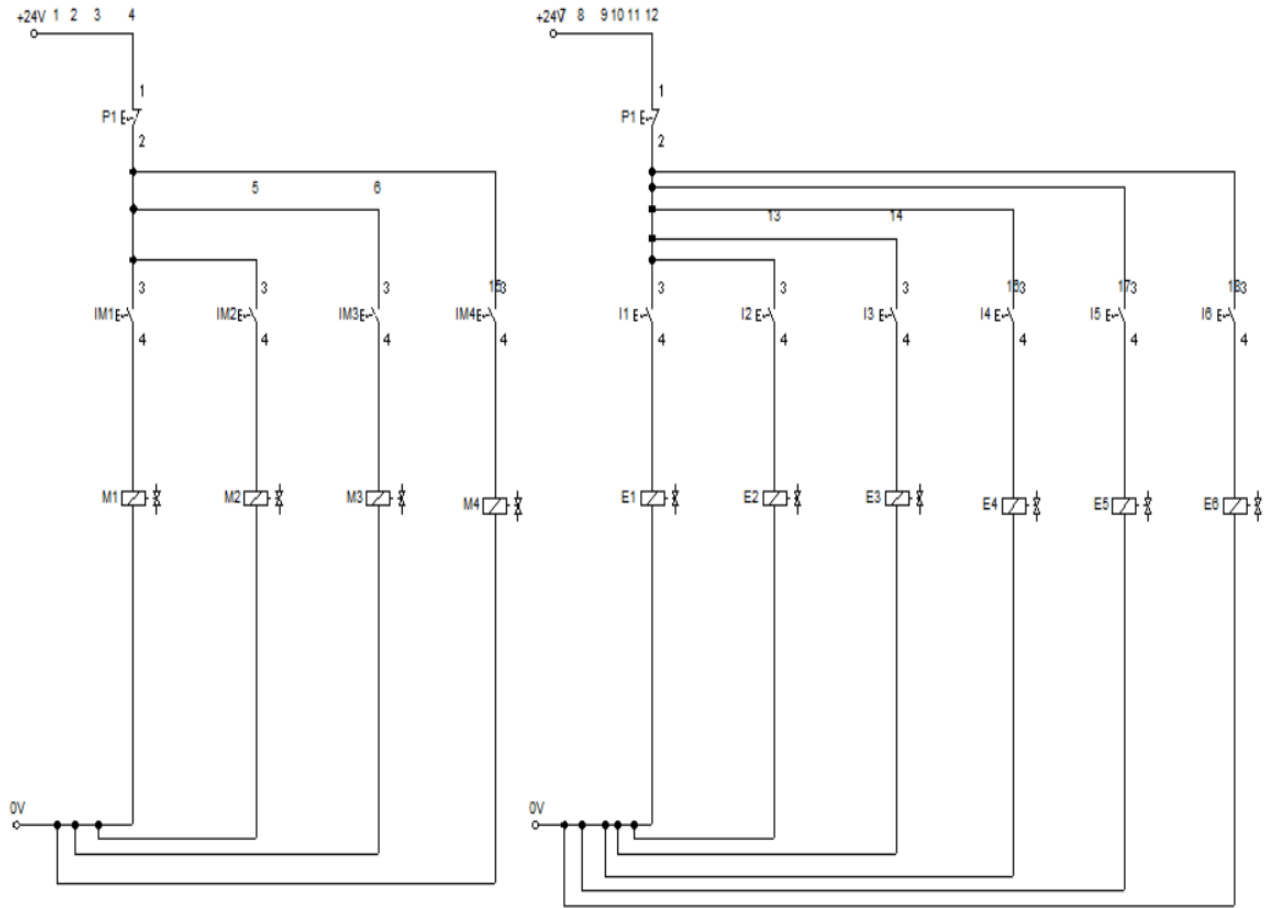
Fuente: Autor

Figura 85 Diseño simulación circuito hidráulico del Slim tube



Fuente: Autor

Figura 86 Diseño simulación circuito de control eléctrico del slim tube



Fuente: Autor

### 5.3. Entregable 3

Montaje parte mecánica del equipo slim tube. Se realizan todas las conexiones entre los tubing, los elementos de unión como cruces, tees, reducciones y elementos de medición y control como los Smar, válvulas y electroválvulas como se aprecia en la Figura 87.

Figura 87 Montaje del equipo slim tube



Fuente: Autor

## 5.4. Entregable 4

Instructivo de operación del equipo Slim Tube:

- 1) Llenar los cilindros de las muestras (normalmente son de una capacidad de 500 a 1000 ml) con los fluidos del estudio, los cuales pueden ser polímeros, crudo o salmueras según el estudio que se vaya a realizar.
- 2) Se inyecta el fluido a analizar utilizando la bomba de desplazamiento positivo a un determinado flujo establecido por el analista y/o por el protocolo establecido por el cliente.
- 3) Se modifican los valores de los parámetros a analizar en el sistema Opto 22 como se aprecia en la figura Figura 88

Figura 88 Parámetros para el cálculo de permeabilidad Opto 22

**Cálculo de permeabilidad**

Campo:

Viscosidad:  cP

Caudal:  ml/min

Longitud:  cm

Diámetro:  cm


Tramo seleccionado:

Permeabilidad Tramo:  mD

Permeabilidad Total:  mD

Temperatura:  °F

**Modo de operación**





Fuente: Autor

- 4) A medida que el fluido recorre la tubería del slim tube empaquetada con la arena o la tierra de la muestra del yacimiento se genera una presión causada por la obstrucción al paso del fluido por parte del medio poroso, esta presión diferencial se registra en los sensores y es captada por la recolección de datos en el programa opto la cual a su vez guarda la información en tablas de Excel.
- 5) Con la información recolectada se obtiene la curva de permeabilidad calculada por 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*

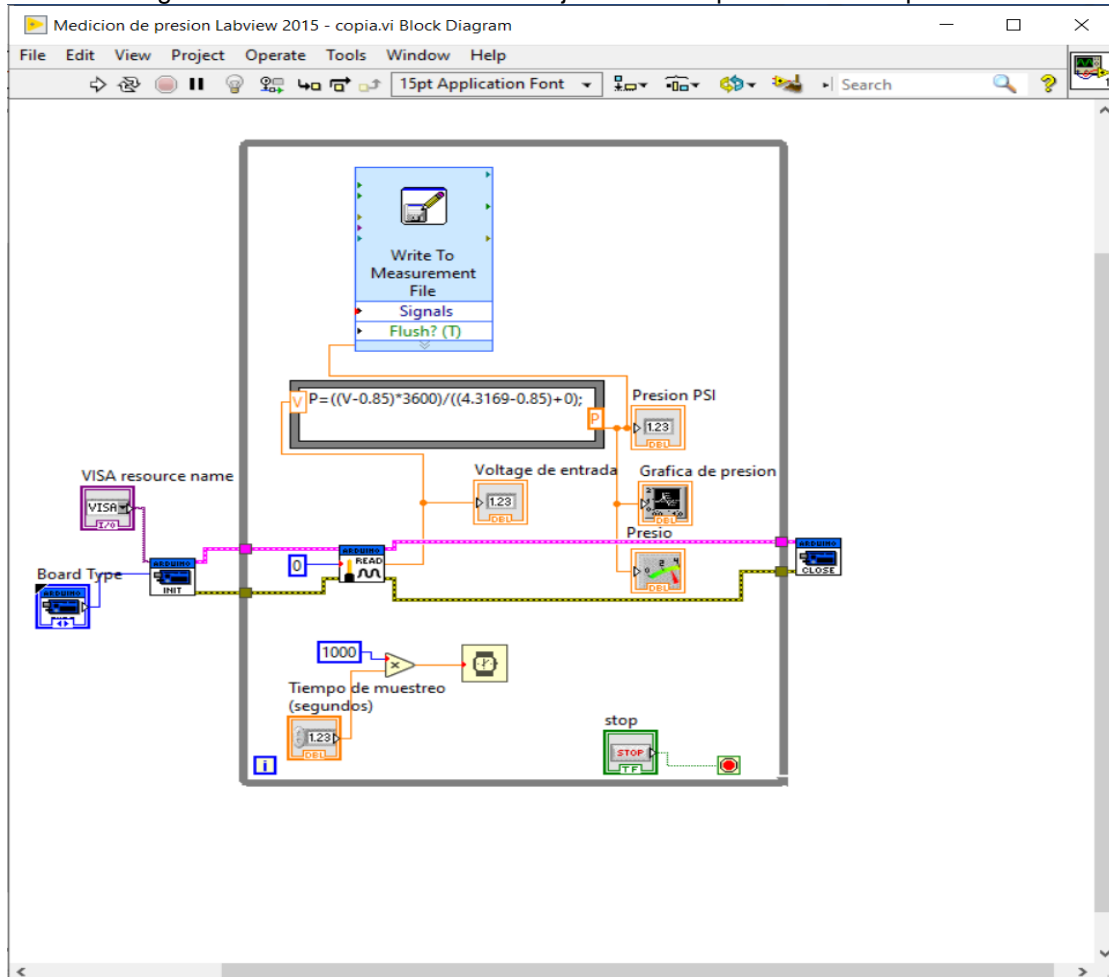
*A = Area*

*ΔP = Diferencial de Presión*

## 5.5. Entregable 5

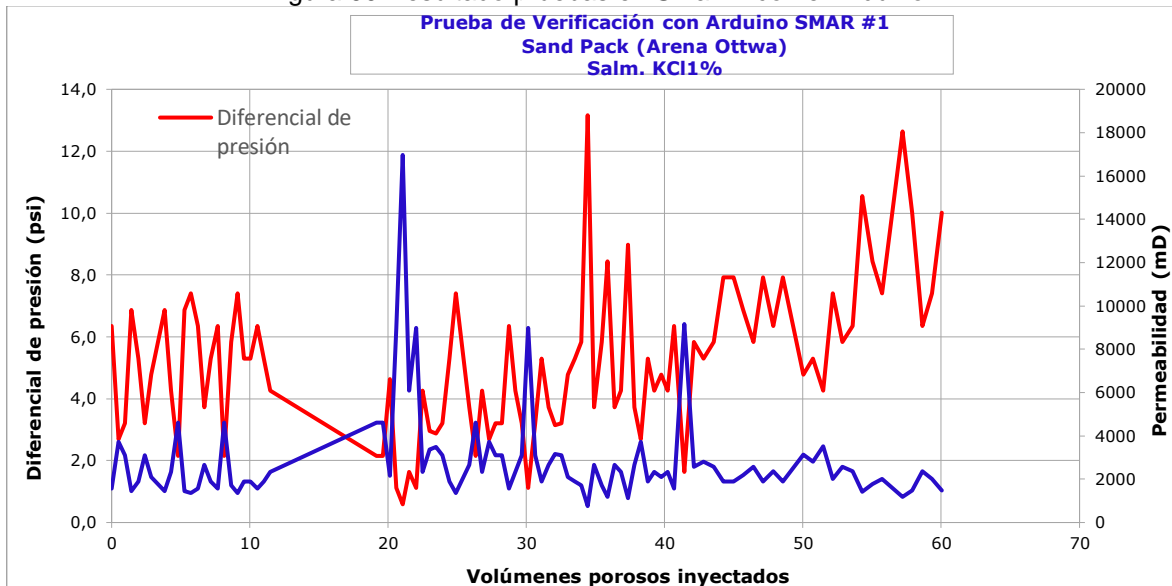
Se realizó una prueba en el Smar 1 utilizando un Arduino a la vez que se hizo con el sistema opto, esto como opción alternativa de recolectar la información de las pruebas de permeabilidad. De acuerdo a la Figura 89, se puede observar que la información captada por el Arduino es muy inestable debido a que este sistema solo percibe señales de voltaje, entonces a través de una conversión matemática que relaciona las presiones y los voltajes se busca traducir para el lenguaje de Arduino una representación numérica, es debido a esta conversión de señales que el valor medido por el Arduino es inexacto a comparación de los valores almacenados por el sistema opto 22, sistema el cual es más detallado, estructurado y complejo.

Figura 89 Conversión señal de voltaje en valor representativo de presión



Fuente: Autor

Figura 90 Resultado pruebas en Smar#1 con el Arduino



Fuente: Autor

Tabla 11 Permeabilidades obtenidas en pruebas con el Smar # 1 con Arduino

| PERMEABILIDADES  |                   |
|--|-------------------|
| Permeabilidad Klinkenberg  | N.A               |
| Permeabilidad absoluta (Sand Pack - Salm KCl1%). Promedio q = 3,0 mL/min |                   |
| Permeabilidad absoluta (Sand Pack - Salm KCl1%). Promedio q = 6,0 mL/min | 2.976,0 mD        |
| Permeabilidad absoluta (Sand Pack - Salm KCl1%). Promedio q = 9 mL/min   | 2.478,4 mD        |
| Permeabilidad absoluta (Sand Pack - Salm KCl1%). Promedio 3 tasas        | <b>2.727,2 mD</b> |

Fuente: Autor

## 5.6. Entregable 6

Las siguientes graficas son el resultado de las pruebas de permeabilidad realizadas en los diferentes Smar que componen el equipo slim tube, en estas pruebas se mide la permeabilidad del sand pack al atravesar el fluido inyectado en el circuito de prueba, estas graficas se obtienen utilizando el sistema opto 22.

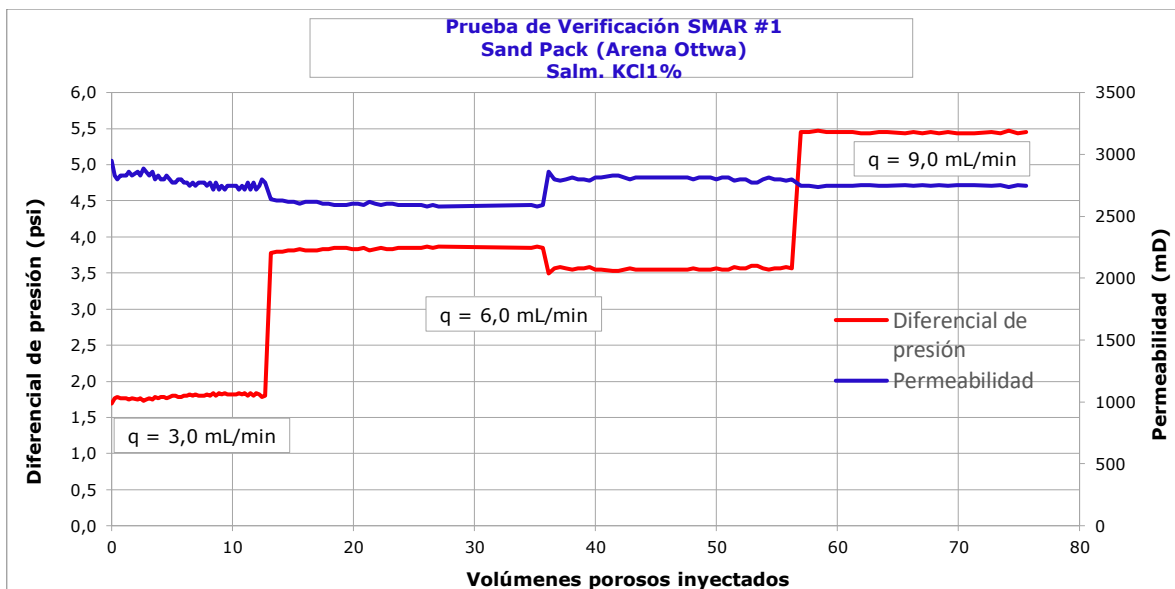
Tabla 12 Datos de la muestra

| DATOS GENERALES DE LA MUESTRA |                    |               |               |                         |                                   |               |         |             |
|-------------------------------|--------------------|---------------|---------------|-------------------------|-----------------------------------|---------------|---------|-------------|
| Pozo                          | Profundidad [pies] | Longitud [cm] | Diámetro [cm] | Área [cm <sup>2</sup> ] | Volumen Poroso [cm <sup>3</sup> ] | Porosidad [%] | Kk [mD] | K Aire [mD] |
| Sand Pack                     | N.A                | 34,400        | 1,270         | 5,067                   | 6,270                             | 22,26         | N. A    | N. A        |

**GRÁFICA**

Fuente: Autor

Figura 91 Resultado pruebas en Smar#1

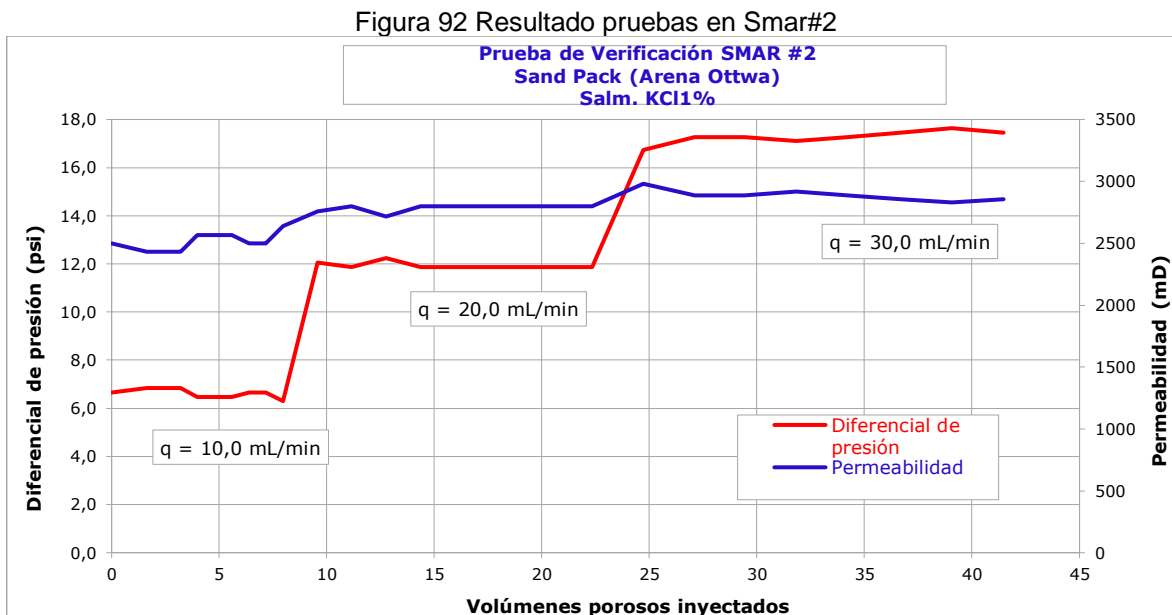


Fuente: Autor

Tabla 13 Permeabilidades obtenidas en pruebas con el Smar # 1

| PERMEABILIDADES   |                   |
|---|-------------------|
| Permeabilidad Klinkenberg   | N. A              |
| Permeabilidad absoluta (Sand Pack). Promedio $q = 3,0$ mL/min     | 2.785,6 mD        |
| Permeabilidad absoluta (Sand Pack). Promedio $q = 6,0$ mL/min     | 2.718,0 mD        |
| Permeabilidad absoluta (salmuera YR-105). Promedio $q = 9$ mL/min | 2.747,6 mD        |
| Permeabilidad absoluta (salmuera YR-105). Promedio 3 tasas        | <b>2.750,4 mD</b> |

Fuente: Autor



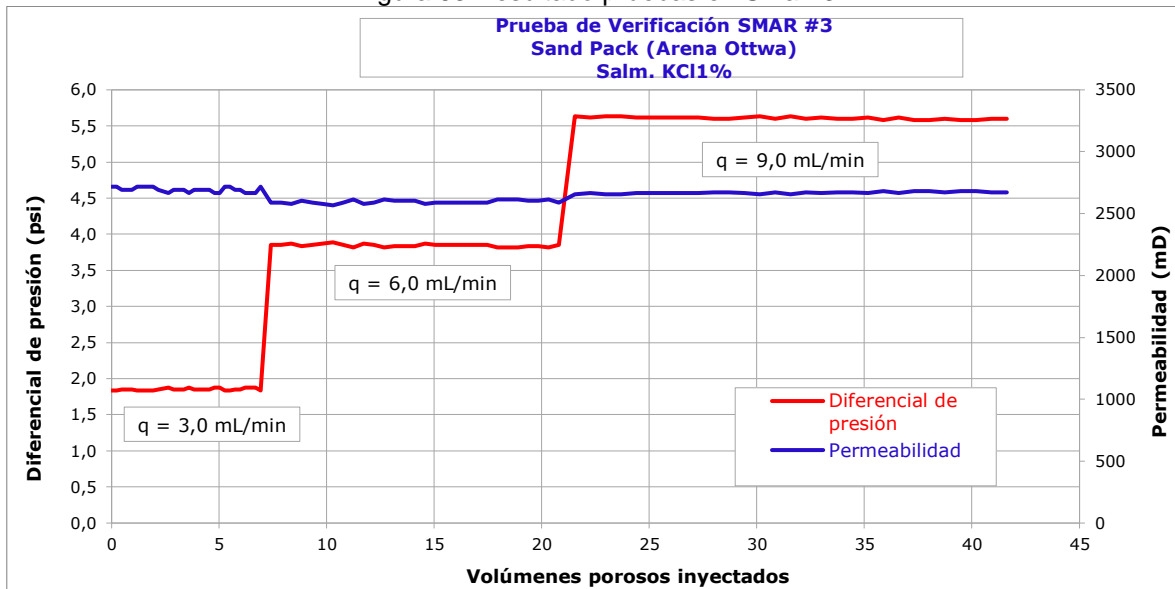
Fuente: Autor

Tabla 14 Permeabilidades obtenidas en pruebas con el Smar #2

| PERMEABILIDADES   |                   |
|---|-------------------|
| Permeabilidad Klinkenberg   | N.A               |
| Permeabilidad absoluta (Sand Pack - Salm KCl1%). Promedio $q = 10,0$ mL/min | 2.512,8 mD        |
| Permeabilidad absoluta (Sand Pack - Salm KCl1%). Promedio $q = 20,0$ mL/min | 2.786,4 mD        |
| Permeabilidad absoluta (Sand Pack - Salm KCl1%). Promedio $q = 30$ mL/min   | 2.888,3 mD        |
| Permeabilidad absoluta (Sand Pack - Salm KCl1%). Promedio 3 tasas           | <b>2.729,1 mD</b> |

Fuente: Autor

Figura 93 Resultado pruebas en Smar#3



Fuente: Autor

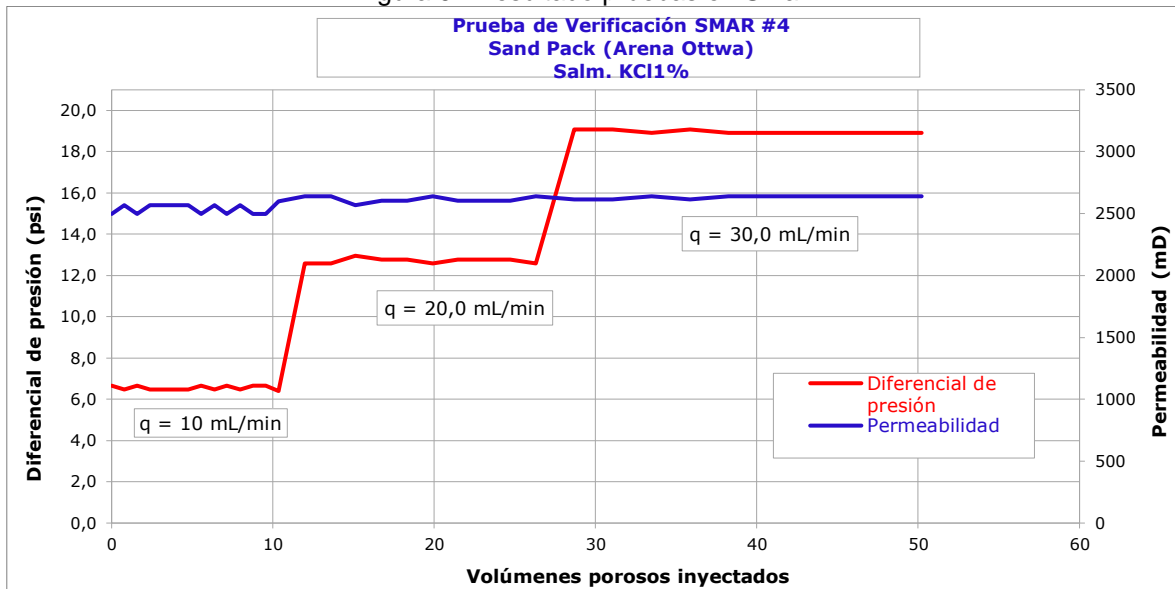
Tabla 15 Permeabilidades obtenidas en pruebas con el Smar #3

| PERMEABILIDADES   |                   |
|---|-------------------|
| Permeabilidad Klinkenberg   | N. A              |
| Permeabilidad absoluta (Sand Pack). Promedio $q = 3,0$ mL/min     | 2.693,3 mD        |
| Permeabilidad absoluta (Sand Pack). Promedio $q = 6,0$ mL/min     | 2.595,9 mD        |
| Permeabilidad absoluta (salmuera YR-105). Promedio $q = 9$ mL/min | 2.669,7 mD        |
| Permeabilidad absoluta (salmuera YR-105). Promedio 3 tasas        | <b>2.653,0 mD</b> |

Fuente: Autor



Figura 94 Resultado pruebas en Smar#4



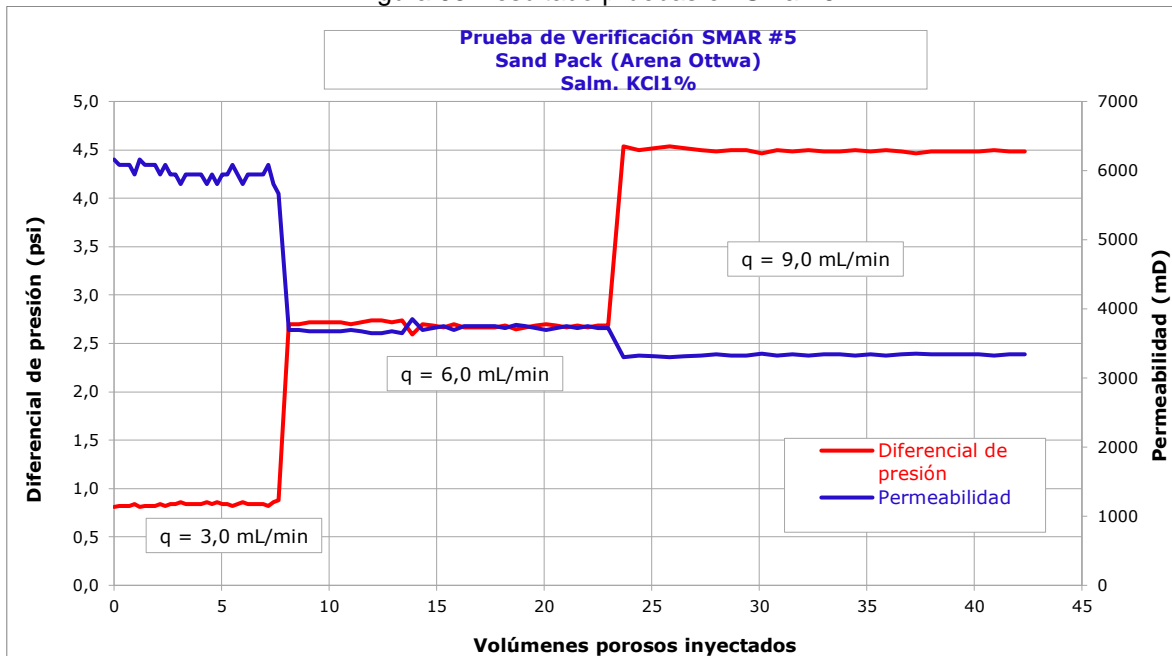
Fuente: Autor

Tabla 16 Permeabilidades obtenidas en pruebas con el Smar #4

| <b>PERMEABILIDADES</b>   |                   |
|--|-------------------|
| Permeabilidad Klinkenberg  | N. A              |
| Permeabilidad absoluta (Sand Pack). Promedio q = 10,0 mL/min     | 2.539,4 mD        |
| Permeabilidad absoluta (Sand Pack). Promedio q = 20,0 mL/min     | 2.614,2 mD        |
| Permeabilidad absoluta (salmuera YR-105). Promedio q = 30 mL/min | 2.632,7 mD        |
| Permeabilidad absoluta (salmuera YR-105). Promedio 3 tasas       | <b>2.595,4 mD</b> |

Fuente: Autor

Figura 95 Resultado pruebas en Smar#5



Fuente: Autor

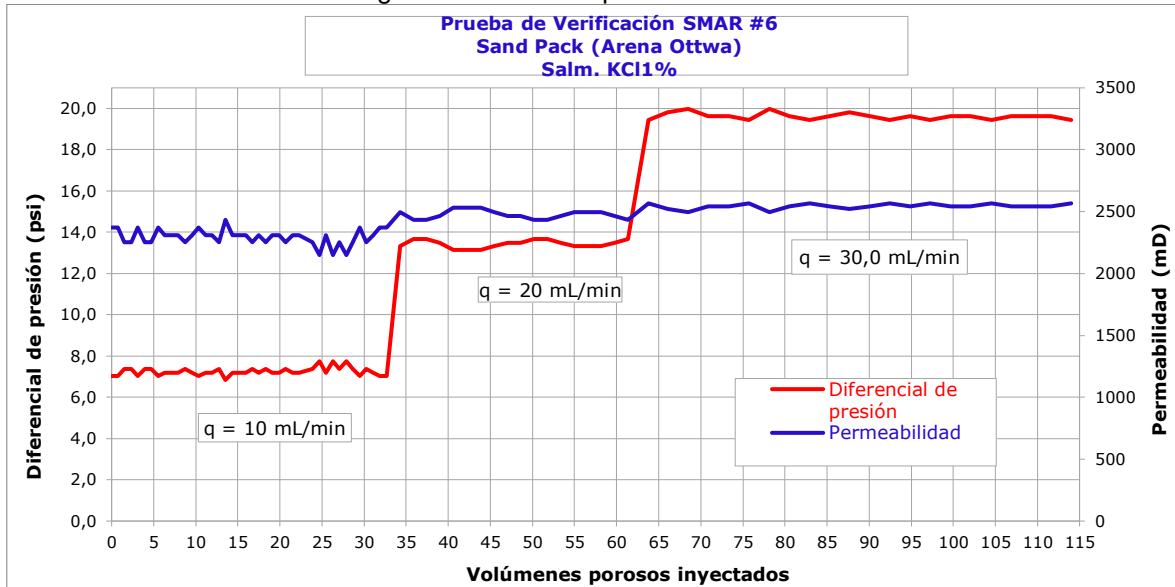
Tabla 17 Permeabilidades obtenidas en pruebas con el Smar #5

| PERMEABILIDADES   |                   |
|---|-------------------|
| Permeabilidad Klinkenberg                                       | N. A              |
| Permeabilidad absoluta (Sand Pack). Promedio q = 3,0 mL/min     | 5.964,0 mD        |
| Permeabilidad absoluta (Sand Pack). Promedio q = 6,0 mL/min     | 3.712,1 mD        |
| Permeabilidad absoluta (salmuera YR-105). Promedio q = 9 mL/min | 3.331,6 mD        |
| Permeabilidad absoluta (salmuera YR-105). Promedio 3 tasas      | <b>4.335,9 mD</b> |

Fuente: Autor

Respecto a las gráficas del Smar #5 durante la prueba se observa que se presenta un error de medida entre el valor que muestra el display del Smar y el valor sentido en el programa Opto 22, este error de medida se reportó al personal de mantenimiento para corregir este detalle.

Figura 96 Resultado pruebas en Smar#6



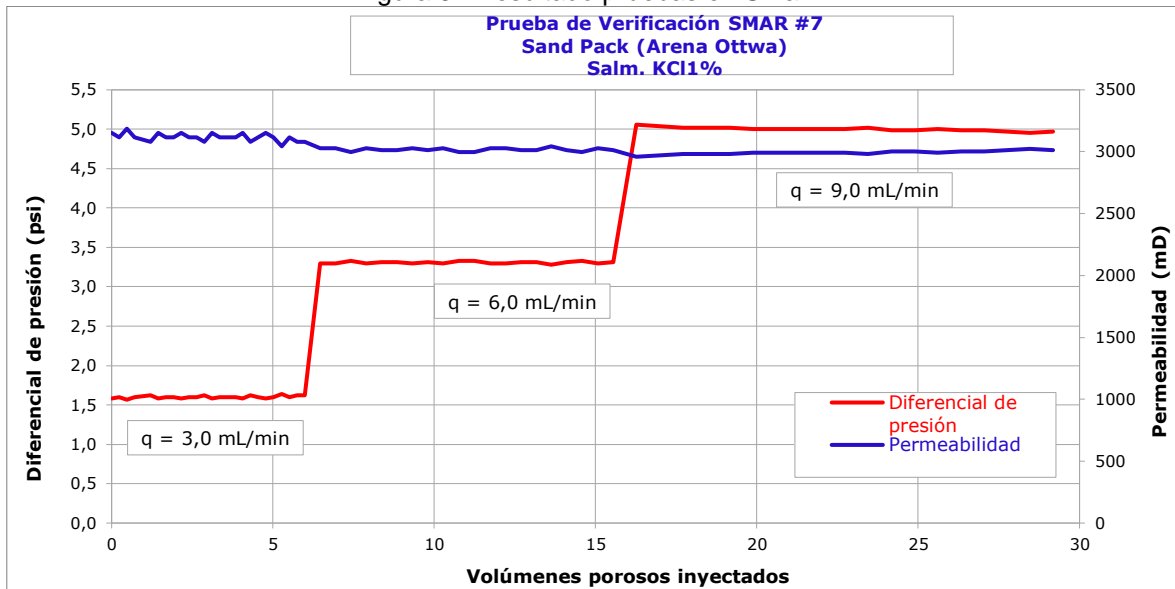
Fuente: Autor

Tabla 18 Permeabilidades obtenidas en pruebas con el Smar #6

| PERMEABILIDADES  |                   |
|--|-------------------|
| Permeabilidad Klinkenberg  | N. A              |
| Permeabilidad absoluta (Sand Pack). Promedio q = 10,0 mL/min     | 2.294,6 mD        |
| Permeabilidad absoluta (Sand Pack). Promedio q = 20,0 mL/min     | 2.475,6 mD        |
| Permeabilidad absoluta (salmuera YR-105). Promedio q = 30 mL/min | 2.544,5 mD        |
| Permeabilidad absoluta (salmuera YR-105). Promedio 3 tasas       | <b>2.438,2 mD</b> |

Fuente: Autor

Figura 97 Resultado pruebas en Smar#7



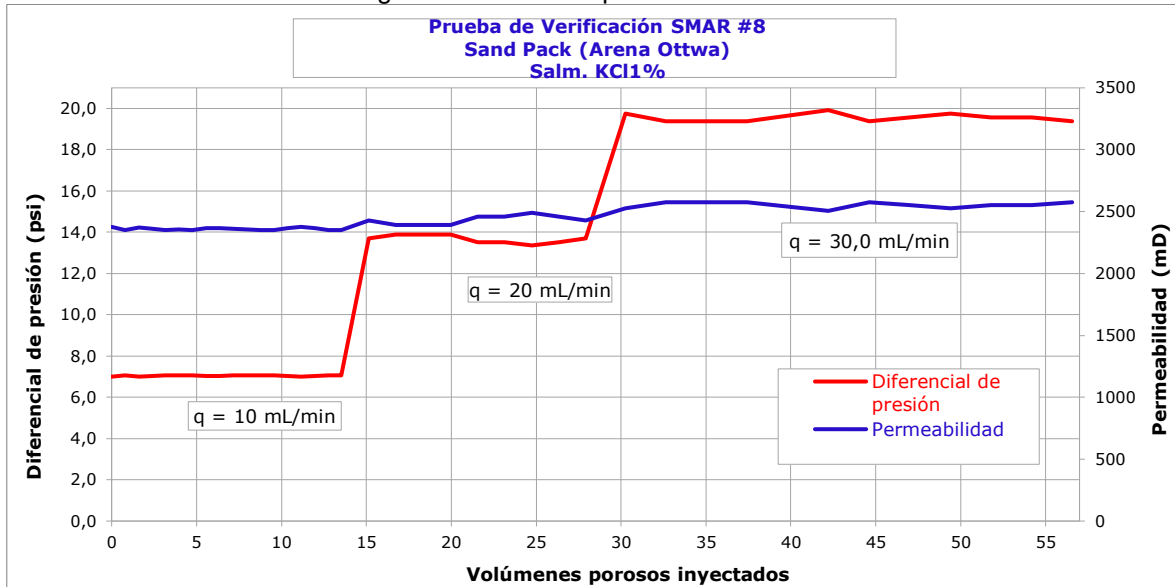
Fuente: Autor

Tabla 19 Permeabilidades obtenidas en pruebas con el Smar #7

| PERMEABILIDADES   |                   |
|---|-------------------|
| Permeabilidad Klinkenberg                                       | N. A              |
| Permeabilidad absoluta (Sand Pack). Promedio q = 3,0 mL/min     | 3.116,5 mD        |
| Permeabilidad absoluta (Sand Pack). Promedio q = 6,0 mL/min     | 3.018,2 mD        |
| Permeabilidad absoluta (salmuera YR-105). Promedio q = 9 mL/min | 2.994,0 mD        |
| Permeabilidad absoluta (salmuera YR-105). Promedio 3 tasas      | <b>3.042,9 mD</b> |

Fuente: Autor

Figura 98 Resultado pruebas en Smar#8



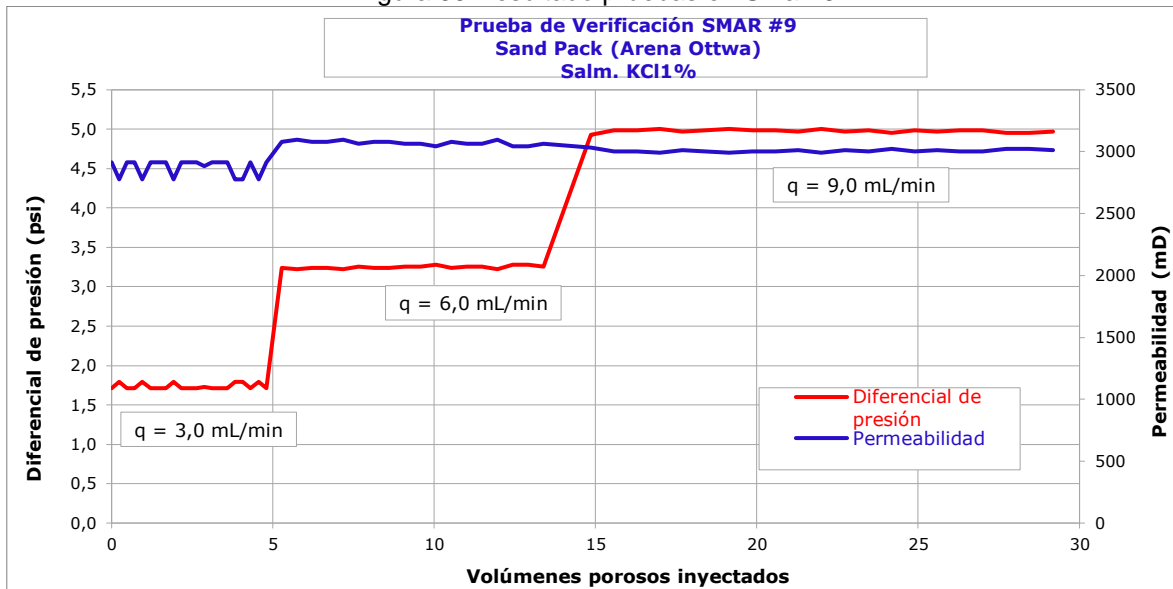
Fuente: Autor

Tabla 20 Permeabilidades obtenidas en pruebas con el Smar #8

| PERMEABILIDADES  |                   |
|--|-------------------|
| Permeabilidad Klinkenberg  | N. A              |
| Permeabilidad absoluta (Sand Pack). Promedio q = 10,0 mL/min     | 2.360,9 mD        |
| Permeabilidad absoluta (Sand Pack). Promedio q = 20,0 mL/min     | 2.433,6 mD        |
| Permeabilidad absoluta (salmuera YR-105). Promedio q = 30 mL/min | 2.554,1 mD        |
| Permeabilidad absoluta (salmuera YR-105). Promedio 3 tasas       | <b>2.449,5 mD</b> |

Fuente: Autor

Figura 99 Resultado pruebas en Smar#9



Fuente: Autor

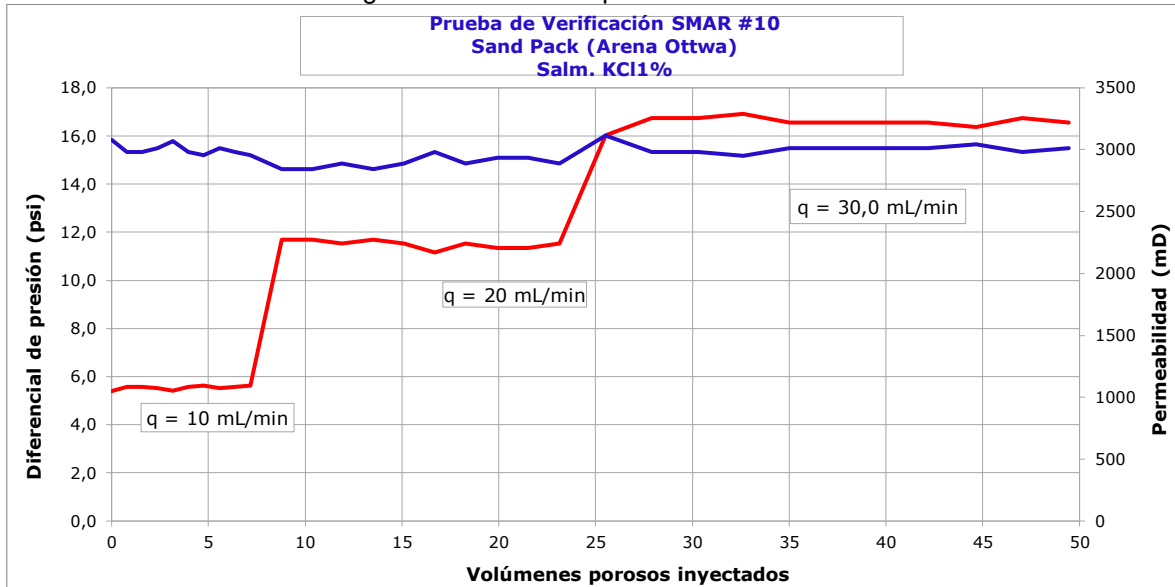
Tabla 21 Permeabilidades obtenidas en pruebas con el Smar #9

| PERMEABILIDADES   |                   |
|---|-------------------|
| Permeabilidad Klinkenberg                                       | N. A              |
| Permeabilidad absoluta (Sand Pack). Promedio q = 3,0 mL/min     | 2.873,8 mD        |
| Permeabilidad absoluta (Sand Pack). Promedio q = 6,0 mL/min     | 3.071,7 mD        |
| Permeabilidad absoluta (salmuera YR-105). Promedio q = 9 mL/min | 3.008,1 mD        |
| Permeabilidad absoluta (salmuera YR-105). Promedio 3 tasas      | <b>2.984,5 mD</b> |

Fuente: Autor



Figura 100 Resultado pruebas en Smar#10



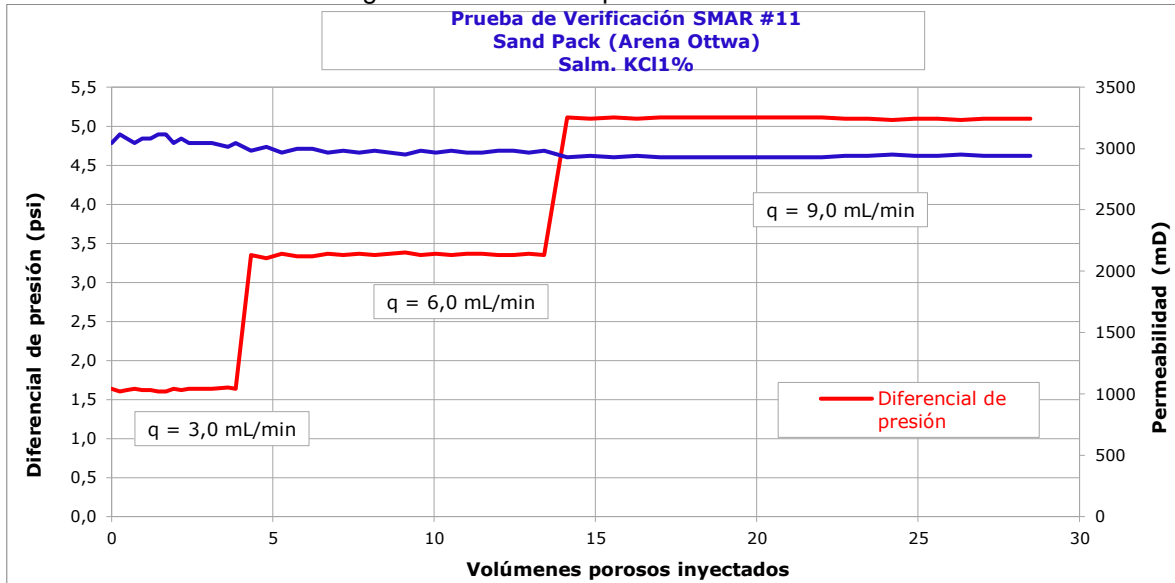
Fuente: Autor

Tabla 22 Permeabilidades obtenidas en pruebas con el Smar #10

| PERMEABILIDADES  |                   |
|--|-------------------|
| Permeabilidad Klinkenberg  | N. A              |
| Permeabilidad absoluta (Sand Pack). Promedio q = 10,0 mL/min     | 3.001,3 mD        |
| Permeabilidad absoluta (Sand Pack). Promedio q = 20,0 mL/min     | 2.892,8 mD        |
| Permeabilidad absoluta (salmuera YR-105). Promedio q = 30 mL/min | 3.010,8 mD        |
| Permeabilidad absoluta (salmuera YR-105). Promedio 3 tasas       | <b>2.968,3 mD</b> |

Fuente: Autor

Figura 101 Resultado pruebas en Smar#11



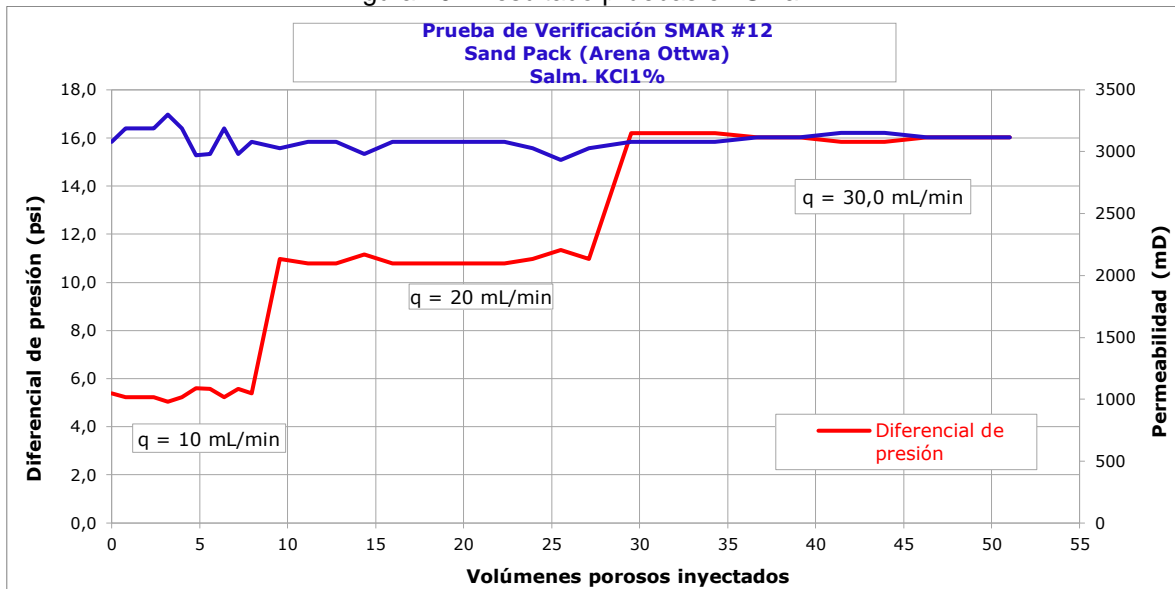
Fuente: Autor

Tabla 23 Permeabilidades obtenidas en pruebas con el Smar #11

| PERMEABILIDADES   |                   |
|---|-------------------|
| Permeabilidad Klinkenberg                                       | N. A              |
| Permeabilidad absoluta (Sand Pack). Promedio q = 3,0 mL/min     | 3.065,5 mD        |
| Permeabilidad absoluta (Sand Pack). Promedio q = 6,0 mL/min     | 2.976,1 mD        |
| Permeabilidad absoluta (salmuera YR-105). Promedio q = 9 mL/min | 2.934,7 mD        |
| Permeabilidad absoluta (salmuera YR-105). Promedio 3 tasas      | <b>2.992,1 mD</b> |

Fuente: Autor

Figura 102 Resultado pruebas en Smar#12



Fuente: Autor

Tabla 24 Permeabilidades obtenidas en pruebas con el Smar #12

| PERMEABILIDADES  |                   |
|--|-------------------|
| Permeabilidad Klinkenberg  | N. A              |
| Permeabilidad absoluta (Sand Pack). Promedio q = 10,0 mL/min     | 3.120,4 mD        |
| Permeabilidad absoluta (Sand Pack). Promedio q = 20,0 mL/min     | 3.044,0 mD        |
| Permeabilidad absoluta (salmuera YR-105). Promedio q = 30 mL/min | 3.111,5 mD        |
| Permeabilidad absoluta (salmuera YR-105). Promedio 2 tasas       | <b>3.092,0 mD</b> |

Fuente: Autor

## 6. ESTRATEGIA DE PROTECCIÓN Y DIVULGACIÓN

Como parte del acuerdo de cooperación N° 02 derivado del convenio marco N° 3015607, suscrito entre Ecopetrol S.A y las Unidades Tecnológicas de Santander – UTS., la actividad planteada y desarrollada en este informe hace parte de un compendio de más actividades que en conjunto tiene el único objetivo de poner en marcha el equipo de medio poroso de mayor longitud (*Slim-Tube*), a un nivel que se pueda determinar por parte de los analistas del Laboratorio de Optimización de Producción y Recobro Mejorado el funcionamiento adecuado del mismo, para el desarrollo de ensayos de laboratorio. Toda la información recopilada en el presente informe está protegida bajo el acuerdo de confidencialidad y no divulgación de información clasificada o reservada.

## 7. CONCLUSIONES

- Las mejoras presentadas en este documento sobre la composición de los puntos de toma de presión y de tomas de muestra, garantizaran una mejor ejecución en los ensayos a realizar en el equipo.
- El equipo slim tube permite simular las condiciones de campo de un yacimiento para el estudio de la técnica de recobro mejorado.
- Durante las pruebas de fuga se aprecia que los puntos más factibles donde se ubican las fugas son en las conexiones, adaptaciones y reducciones de tubería.
- Las simulaciones realizadas por los programas digitales facilitan el entendimiento del funcionamiento del slim tube.
- Basados en las gráficas obtenidas de las pruebas en los Smar, se concluye que la permeabilidad es estable y por ende se puede asegurar que cumple la ley de Darcy.
- El sistema más óptimo para recolectar la información relacionada a las pruebas en el slim tube es el Opto 22.
- Las fugas deben mitigarse para que los resultados en los diferenciales de presión no varíen bruscamente.
- El equipo Slim tube queda en un estado de operación funcional, después de atender las recomendaciones dadas sobre los Smar #5 y #6, se puede concluir que el equipo está disponible para empezar a realizar pruebas de laboratorio a condiciones de yacimiento.

## 8. Recomendaciones

- En el diseño CAD planteado, para la creación del plano general del ensamble del equipo, se plantearon ciertas geometrías en las conexiones de los diferentes accesorios del sistema, sin embargo, dichas conexiones están sujetas a modificaciones según lo requieran los analistas de laboratorio.
- Al momento de poner en funcionamiento el slim tube se debe hacer el empaquetamiento y saturar la tubería (que va dentro del horno) con la tierra o arena de muestra la cual se busca analizar, se recomienda compactar utilizando los métodos adecuados y sellar evitando fugas de arena, debido a que esto puede afectar los resultados obtenidos en las pruebas.
- Una vez que se compren los elementos que hacen falta para el sistema del backpressure se recomienda reemplazar el sistema manual de muestras instalado por el sistema automatizado de backpressure.
- La instalación de la parte eléctrica y neumática del equipo slim tube fue realizada por el grupo de mantenimiento del ICP debido a que solo ellos tienen permiso de realizar este tipo de actividades, por tal razón, toda información referente a temas de mantenimiento eléctrico y neumático debe ser consultado con ellos.
- Debido a las variaciones en los resultados de permeabilidad obtenidos, se recomienda realizar nuevamente la prueba, si los valores de permeabilidad siguen variando siendo muy distantes los unos a los otros, se recomienda al equipo de laboratorio de recobro mejorado solicitar nuevamente la calibración de todos los Smar o verificar el funcionamiento del sistema Opto.

- El Smar #5 presentó problemas en la lectura que muestra en el display, variando en un valor de presión de 0,8 psi con respecto a la lectura mostrada en el sistema opto 22, esta variación como se detalla en la Figura 95 afecta la gráfica obtenida de este Smar, por tal razón se recomienda que este Smar sea revisado por personal de mantenimiento para arreglar problemas relacionados a funcionamiento, programación o calibración.
- El Smar #6 presentó problemas en el display, debido a que no mostraba claramente el valor medido, se recomienda ser revisado por el personal de mantenimiento para descartar fallas técnicas.
- Al momento de realizar las pruebas en los Smar con el circuito de prueba se recomienda verificar que no hayan perdidas de aceite en la sección de medición, debido a que se tiene la hipótesis que una de las causas por las que se presentaron variaciones observables en las diferencias entre permeabilidades pudo ser ocasionada por la pérdida del aceite en la sección de medida al momento de cambiarse de Smar en Smar, para descartar este tipo de error se recomienda cada vez que se haga la prueba en un Smar distinto se recargue la sección de medición con el aceite mineral.



## 9. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

140967.pdf. (s. f.). Recuperado 18 de mayo de 2022, de <http://tangara.uis.edu.co/biblioweb/tesis/2011/140967.pdf>

Bolívar, G. (2020, junio 17). Permeabilidad: Concepto, unidades, factores, ejemplos. *Lifeder*. <https://www.lifeder.com/permeabilidad/>

Coreflooding. (s. f.). Recuperado 18 de mayo de 2022, de <https://glossary.oilfield.slb.com/en/Terms/c/coreflooding.aspx>

*D series—Bomba de agua by Teledyne Isco | DirectIndustry*. (s. f.). Recuperado 18 de mayo de 2022, de <https://www.directindustry.es/prod/teledyne-isco/product-22360-1278471.html>

*Definición de porosidad—Definicion.de*. (s. f.). Definición.de. Recuperado 18 de mayo de 2022, de <https://definicion.de/porosidad/>

Digital, A. E. M. (s. f.). *HART Pressure Transmitter*. SMAR Technology Company. Recuperado 18 de mayo de 2022, de <https://www.smar.com/en>

Eor. (s. f.). Recuperado 18 de mayo de 2022, de <https://glossary.oilfield.slb.com/es/Terms/e/eor.aspx>

*Grados API y gravedad específica de los hidrocarburos—Combustibles líquidos*. (2013). 6. *Los Hidrocarburos.pdf*. (s. f.). Recuperado 18 de mayo de 2022, de <http://www.une.edu.pe/docentesune/jjhoncon/Descargas/Fasciculos%20CTA/Los%20Hidrocarburos.pdf>

*Medio poroso | Oilfield Glossary*. (s. f.). Recuperado 18 de mayo de 2022, de [https://glossary.oilfield.slb.com/es/terms/p/porous\\_medium](https://glossary.oilfield.slb.com/es/terms/p/porous_medium)

F-DC-125

INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO EN MODALIDAD DE PROYECTO  
DE INVESTIGACIÓN, DESARROLLO TECNOLÓGICO, MONOGRAFÍA,  
EMPRENDIMIENTO Y SEMINARIO

VERSIÓN: 1.0

*Paris de Ferrer, M. (2001). Inyección de agua y gas en yacimientos petrolíferos. Maracaibo:*

*Astro Dala S.A. (s. f.).*

Petróleo. (2022). En *Wikipedia, la enciclopedia libre.*

<https://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Petr%C3%B3leo&oldid=143452177>

*Racores para tubo con sistema doble anillo a compresión Megalok®: Mecesa. (s. f.).*

Recuperado 18 de mayo de 2022, de

[https://www.mecesa.com/products/?action=list\\_product&family\\_id=1](https://www.mecesa.com/products/?action=list_product&family_id=1)

THERMOLAB TH720. (s. f.). *DIES.* Recuperado 18 de mayo de 2022, de

<https://www.dies.com.co/productos/hornos-estufas-universales/thermolab-hornos-universales-para-piso/thermolab-th720/>

*Vinci Technologies | Back pressure regulator (BPR series). (s. f.).* Recuperado 18 de mayo

de 2022, de <https://www.vinci-technologies.com/bpr-series-back-pressure-regulator/components/special-core-analysis/rocks-and-fluids/113495/>

*Vindum Engineering. (s. f.).* Vindum Engineering. Recuperado 18 de mayo de 2022, de

<https://vindum.com/products/vindum-cv-automated-valves>

*Viscosidad—EcuRed. (s. f.).* Recuperado 18 de mayo de 2022, de

<https://www.ecured.cu/Viscosidad>

*Wauquier, J. P. (2004). El Refino del Petróleo. Madrid: Díaz de Santos. (s. f.).*

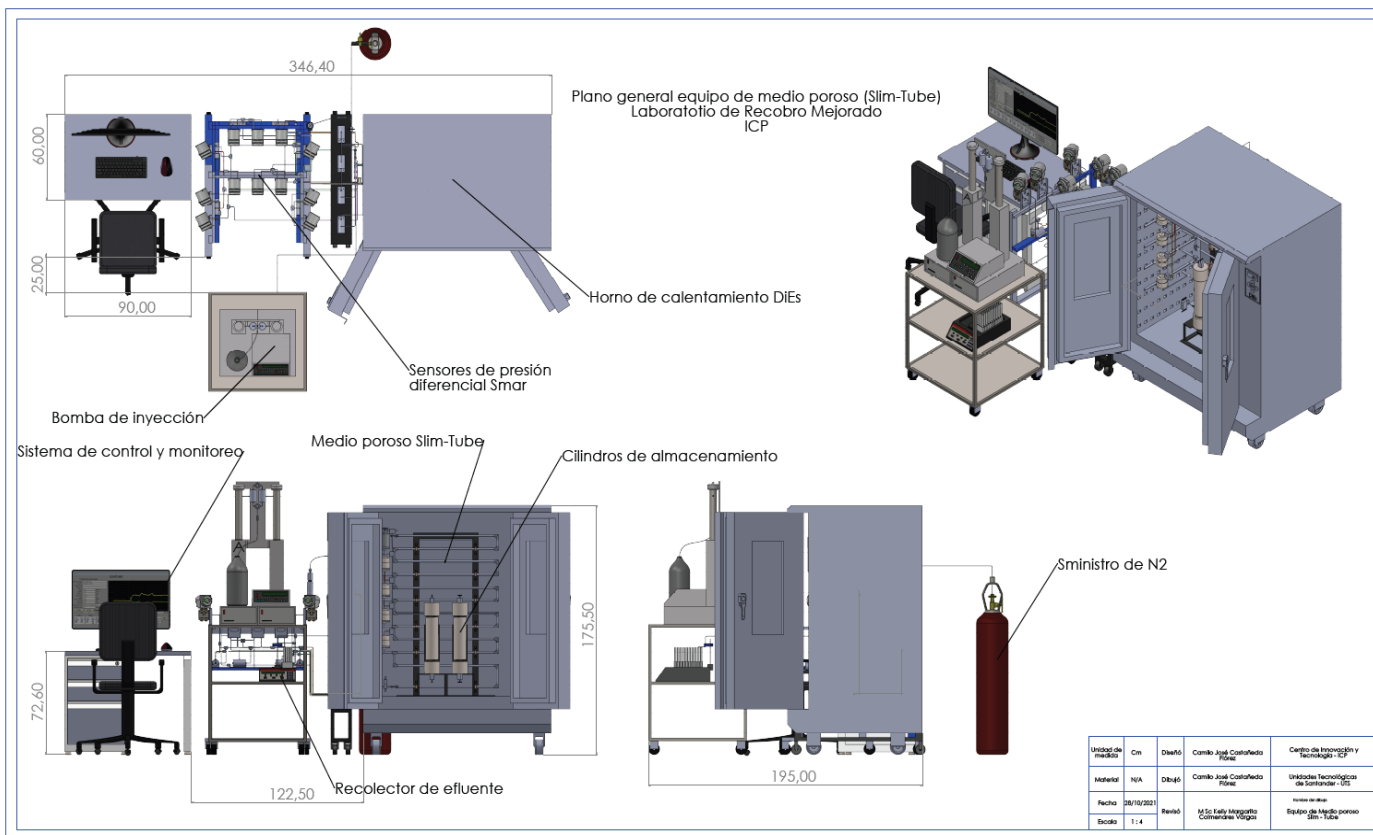
Yacimiento geológico. (2021). En *Wikipedia, la enciclopedia libre.*

[https://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Yacimiento\\_geol%C3%B3gico&oldid=136485613](https://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Yacimiento_geol%C3%B3gico&oldid=136485613)

## 10. Anexos

### 10.1. Anexo A – Plano General del ensamble del equipo de medio Poroso de mayor longitud

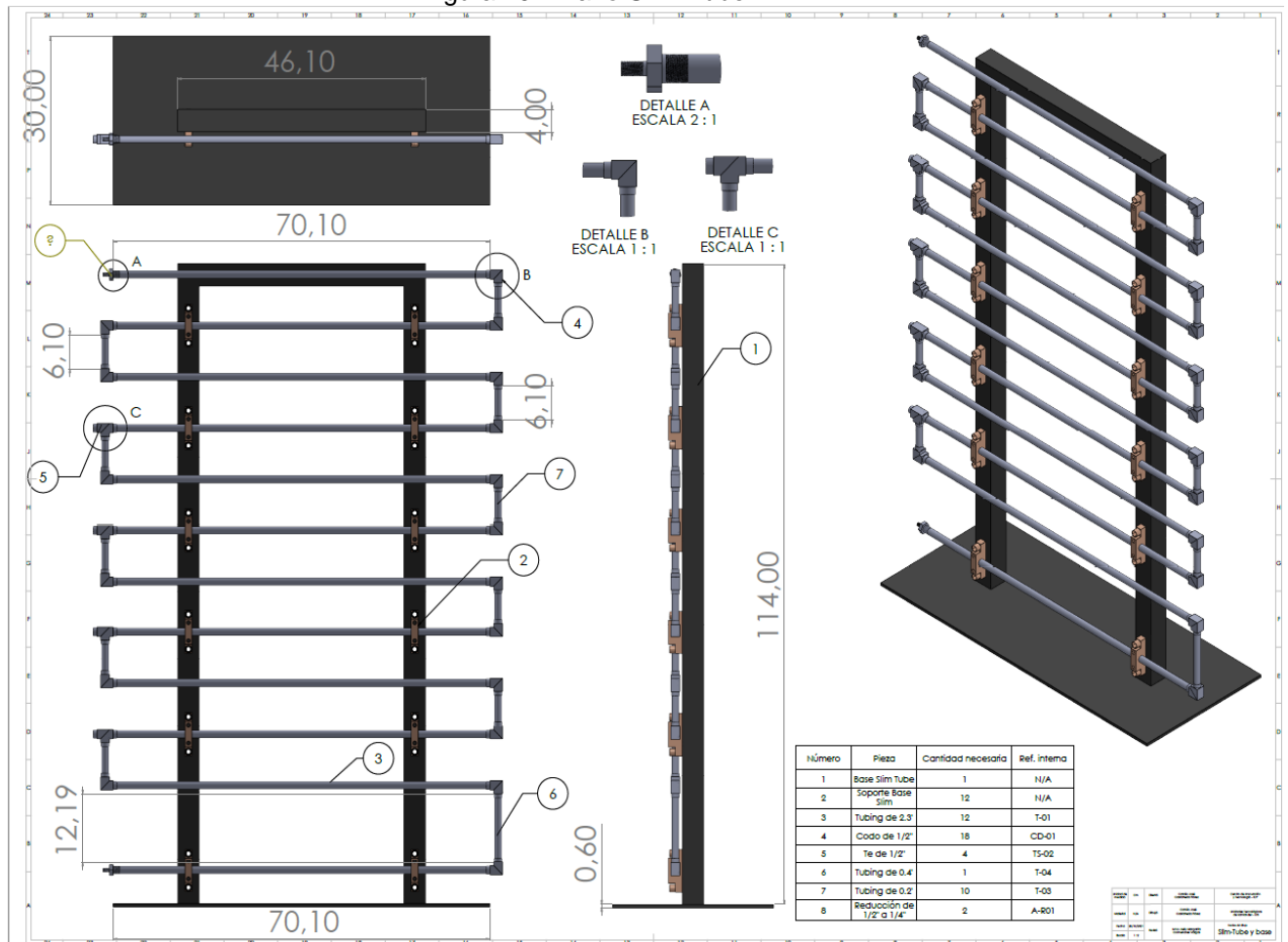
Figura 103 Plano General Equipo Medio Poroso (Slim-Tube)



Fuente: Autor

### 10.2. Anexo B – Plano del Slim-Tube y su base

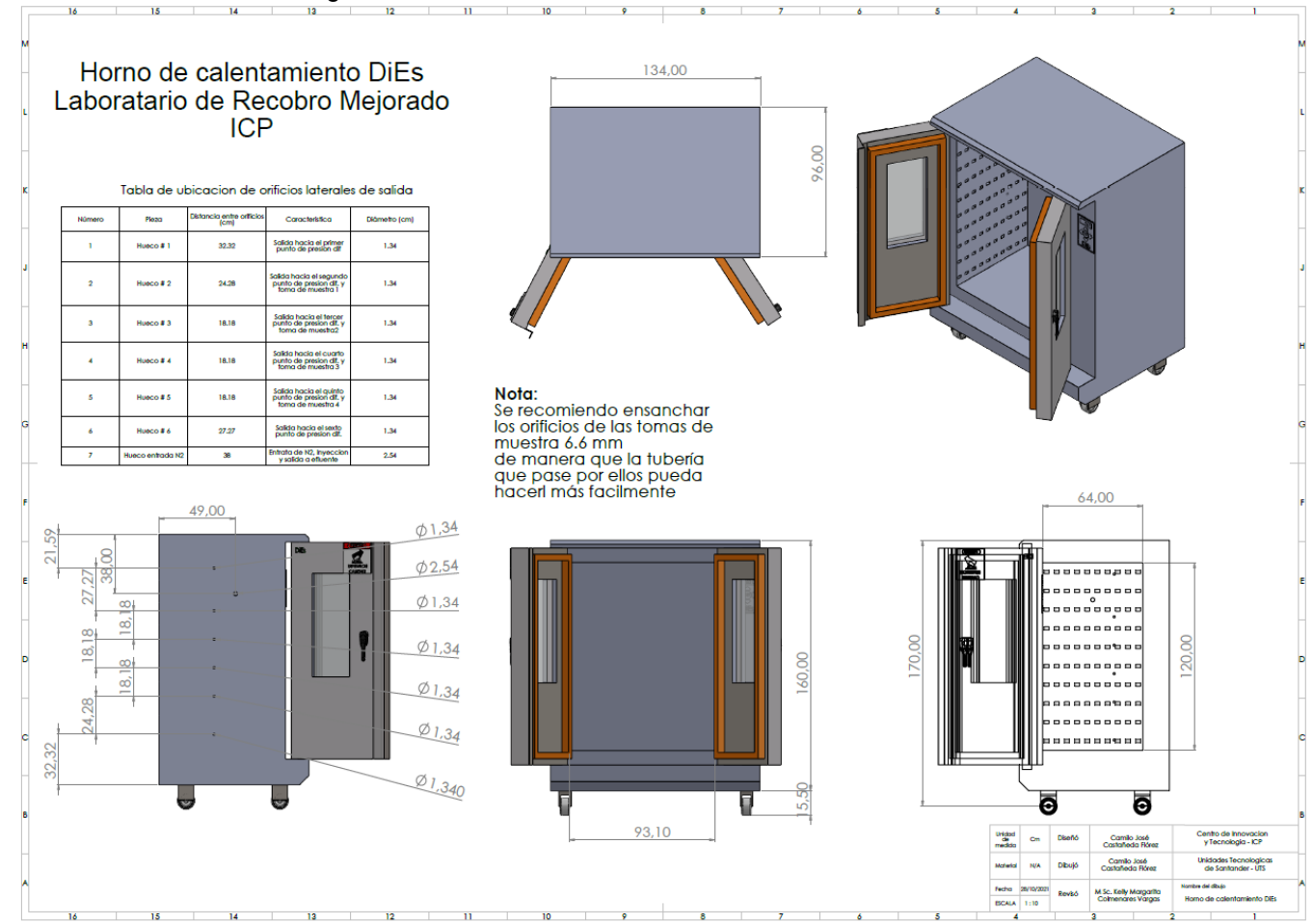
Figura 104 Plano Slim-Tube



Fuente: Autor

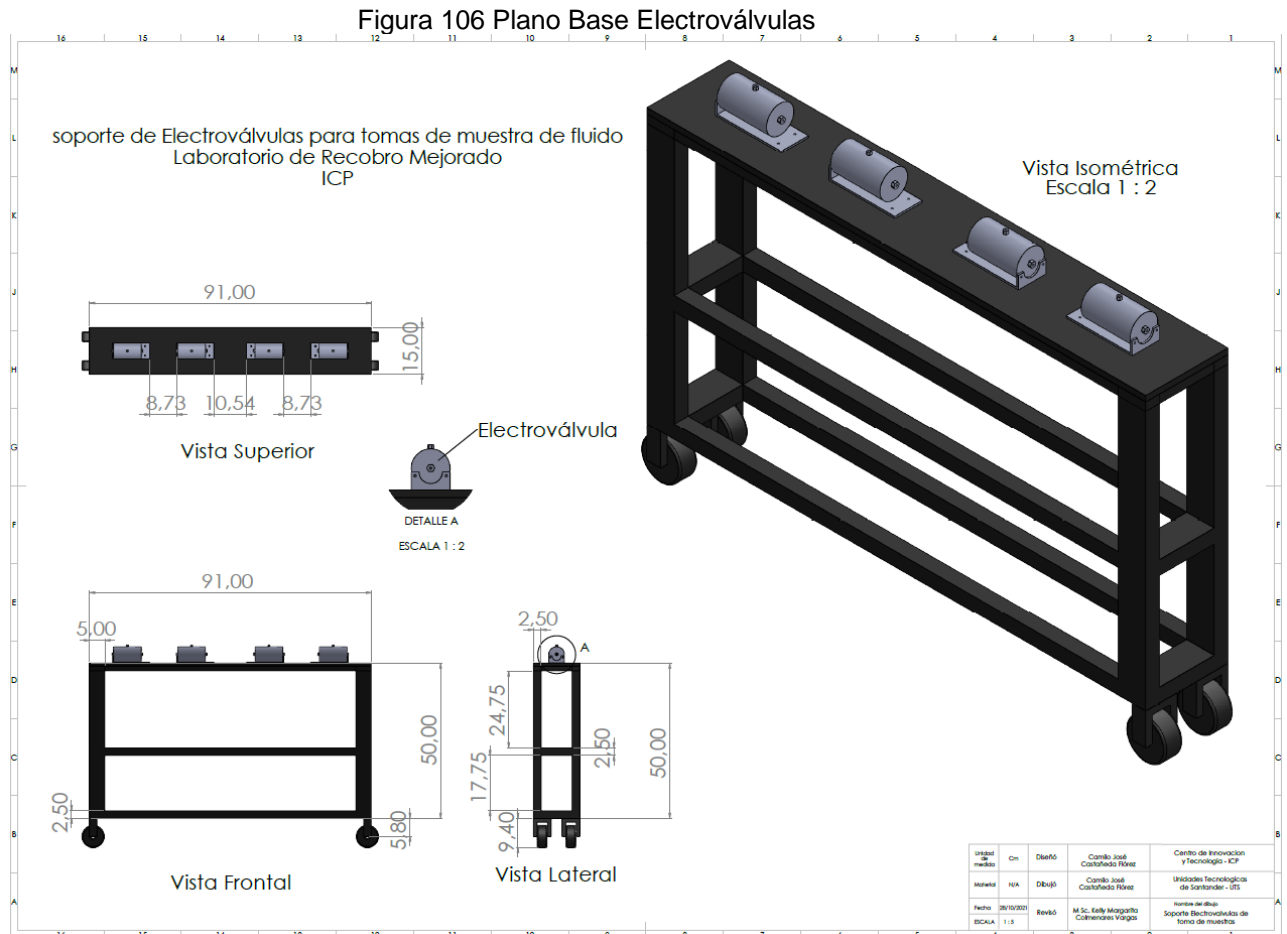
### 10.3. Anexo C – Plano del Horno DiEs

Figura 105 Plano Horno de calentamiento DiEs



Fuente: Autor

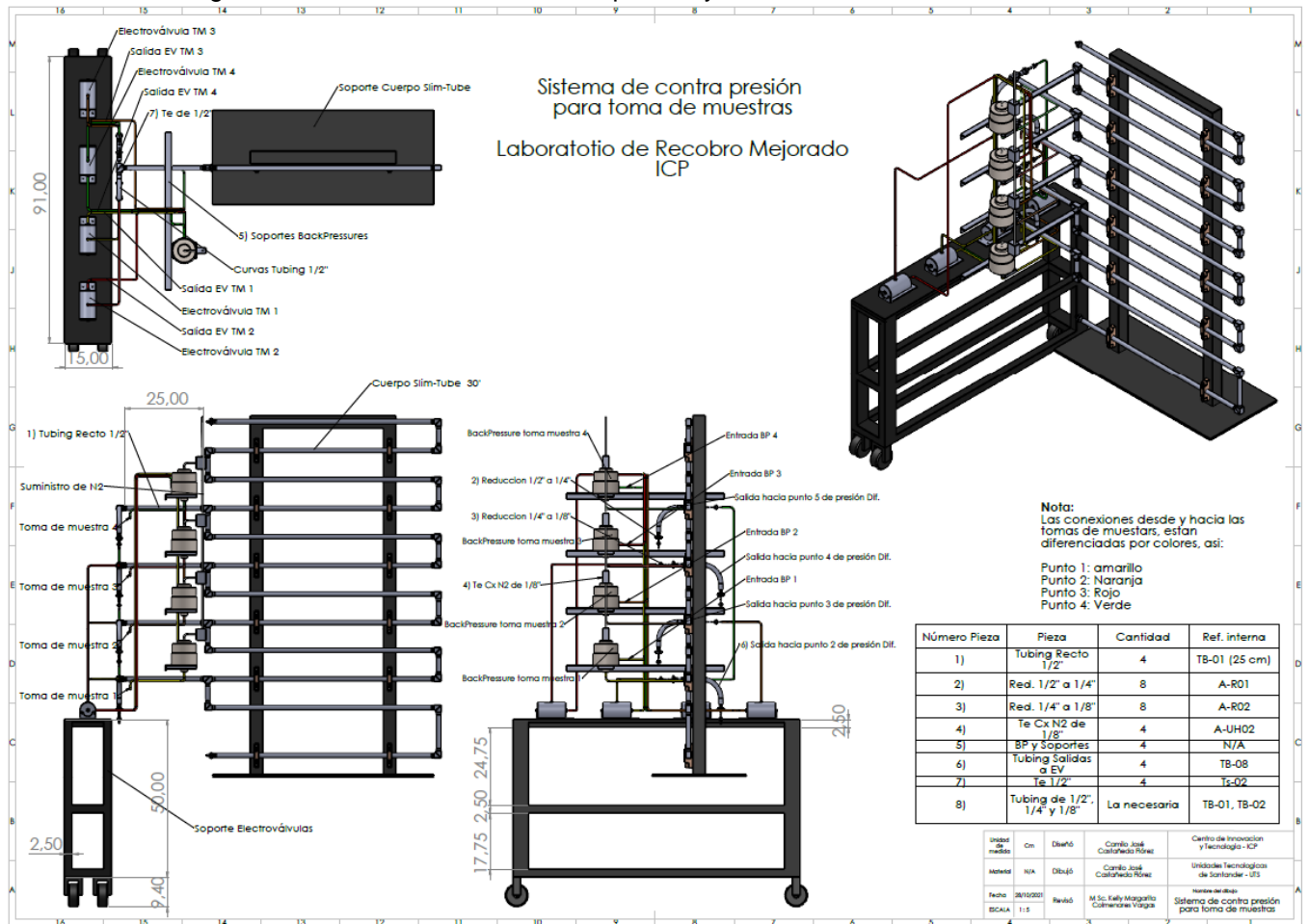
### 10.4. Anexo D – Plano de Base de Electroválvulas toma de muestra



Fuente: Autor

### 10.5. Anexo E – Plano del sistema de contra presión y toma de muestras

Figura 107 Plano Sistema de contra presión y toma de muestras

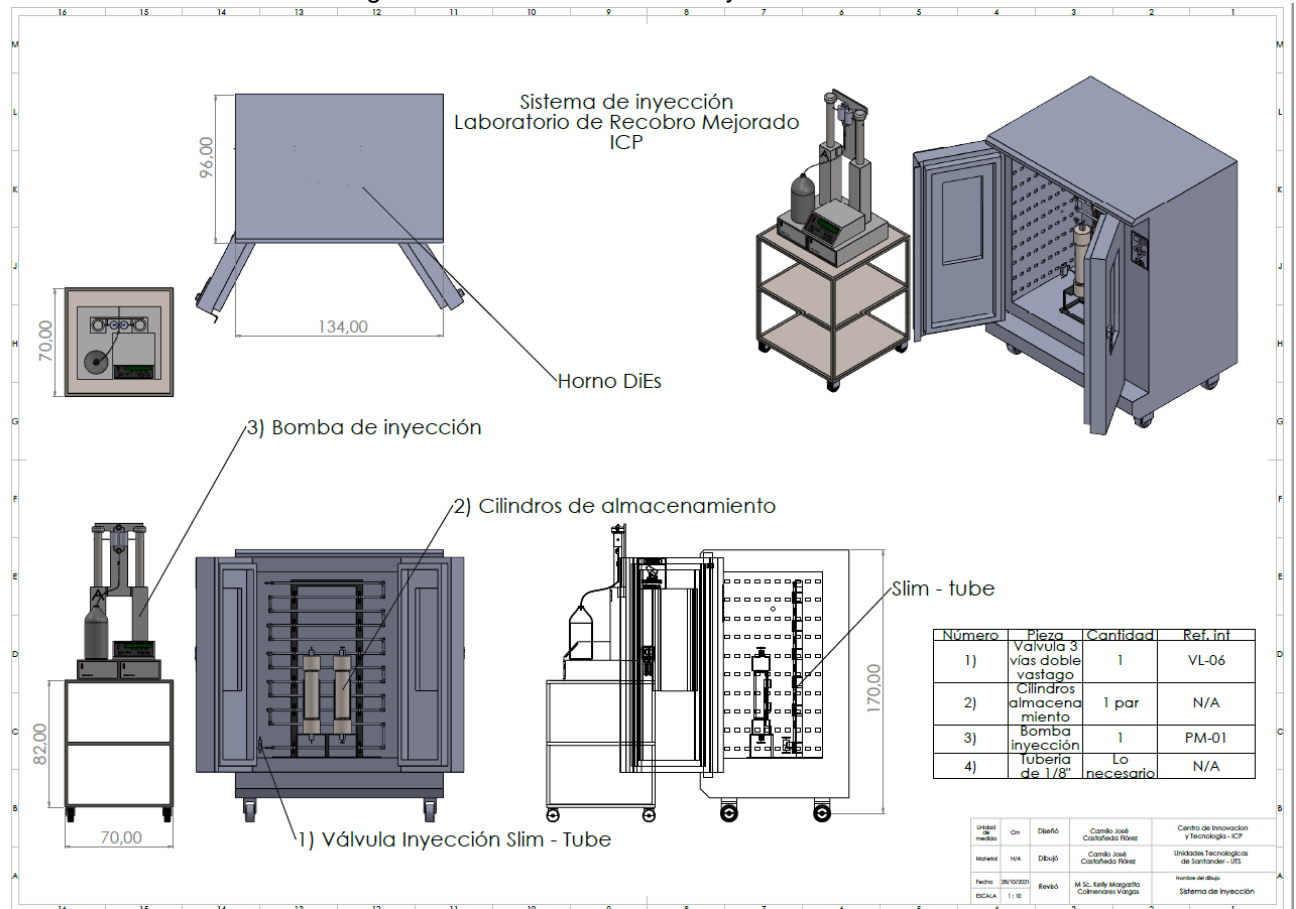


Fuente: Autor

## 10.6. Anexo F – Plano del sistema de inyección



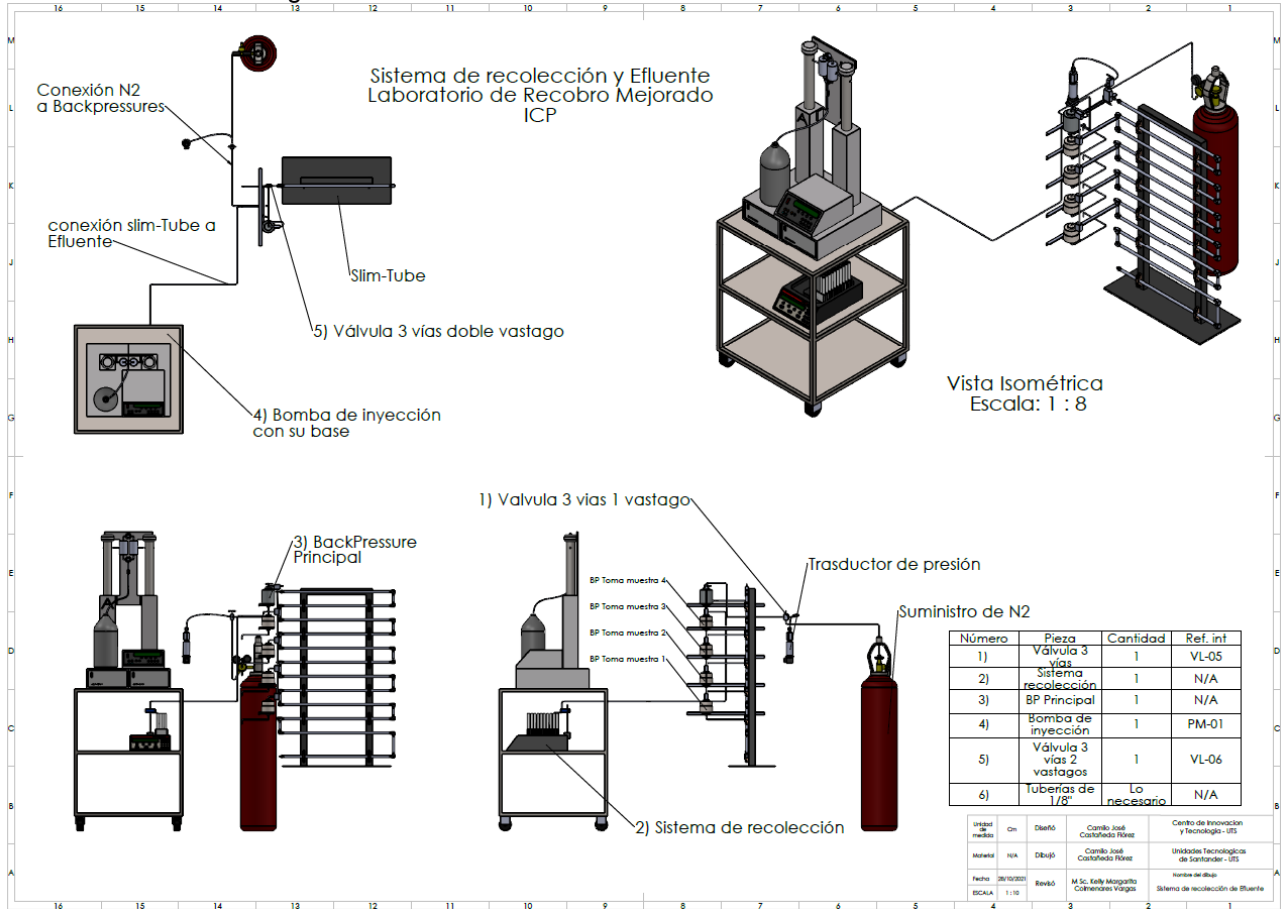
Figura 108 Plano Sistema de Inyección



Fuente: Autor

## 10.7. Anexo G – Plano del sistema de recolección de efluente

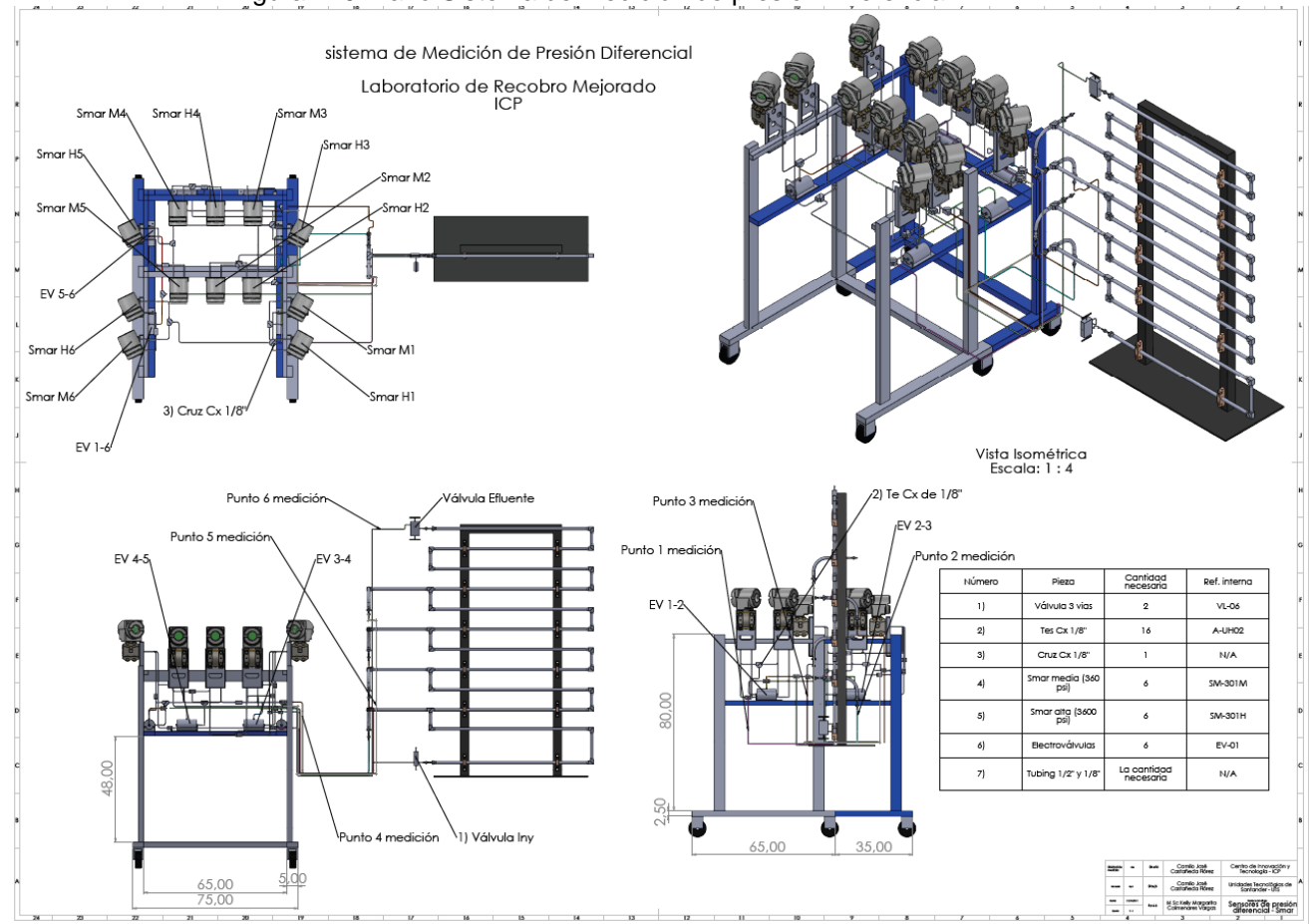
Figura 109 Plano sistema de Recolección de Efluente



Fuente: Autor

## 10.8. Anexo H – Plano de configuración de sensores Smar

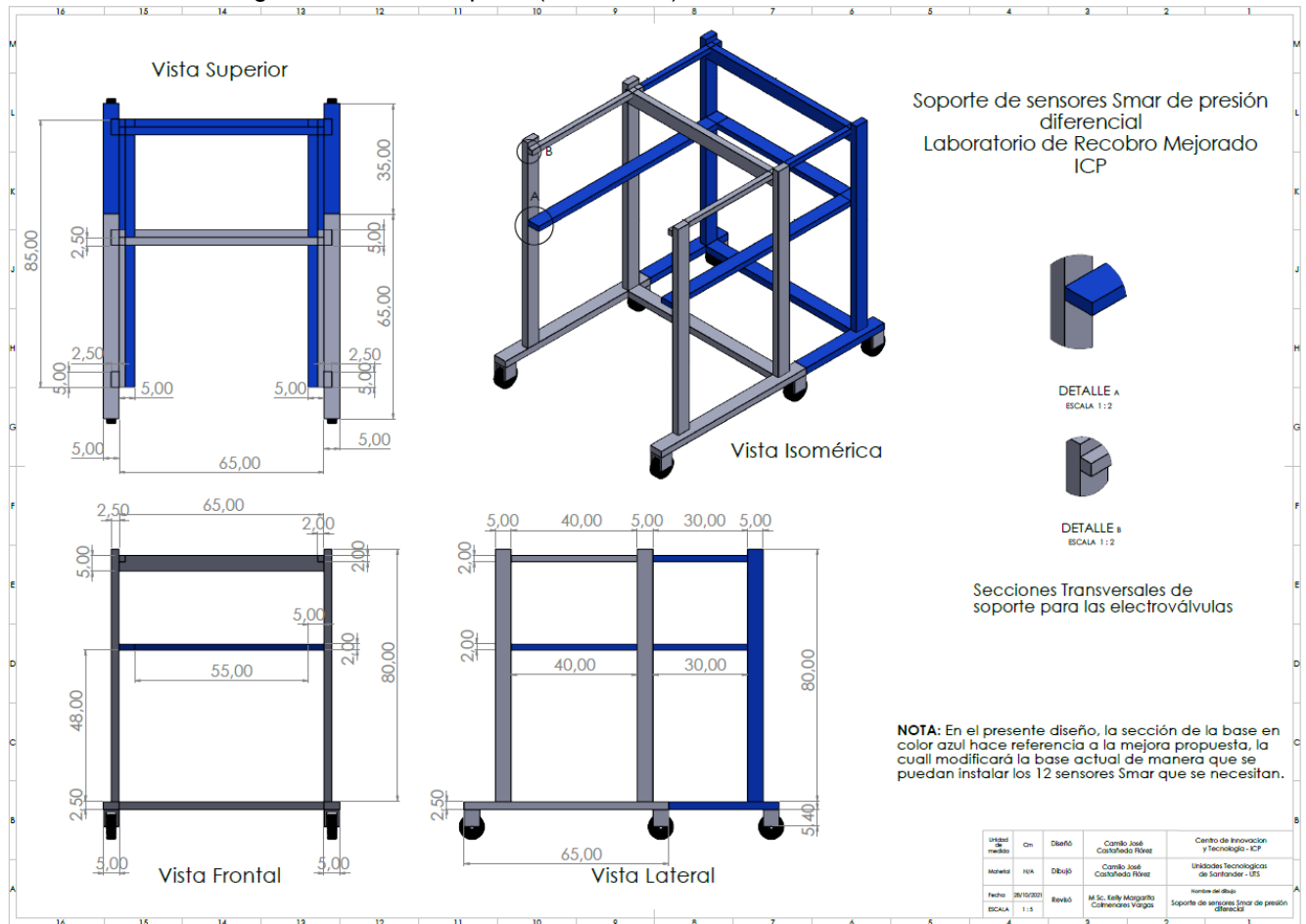
Figura 110 Plano Sistema de Medición de presión Diferencial



Fuente: Autor

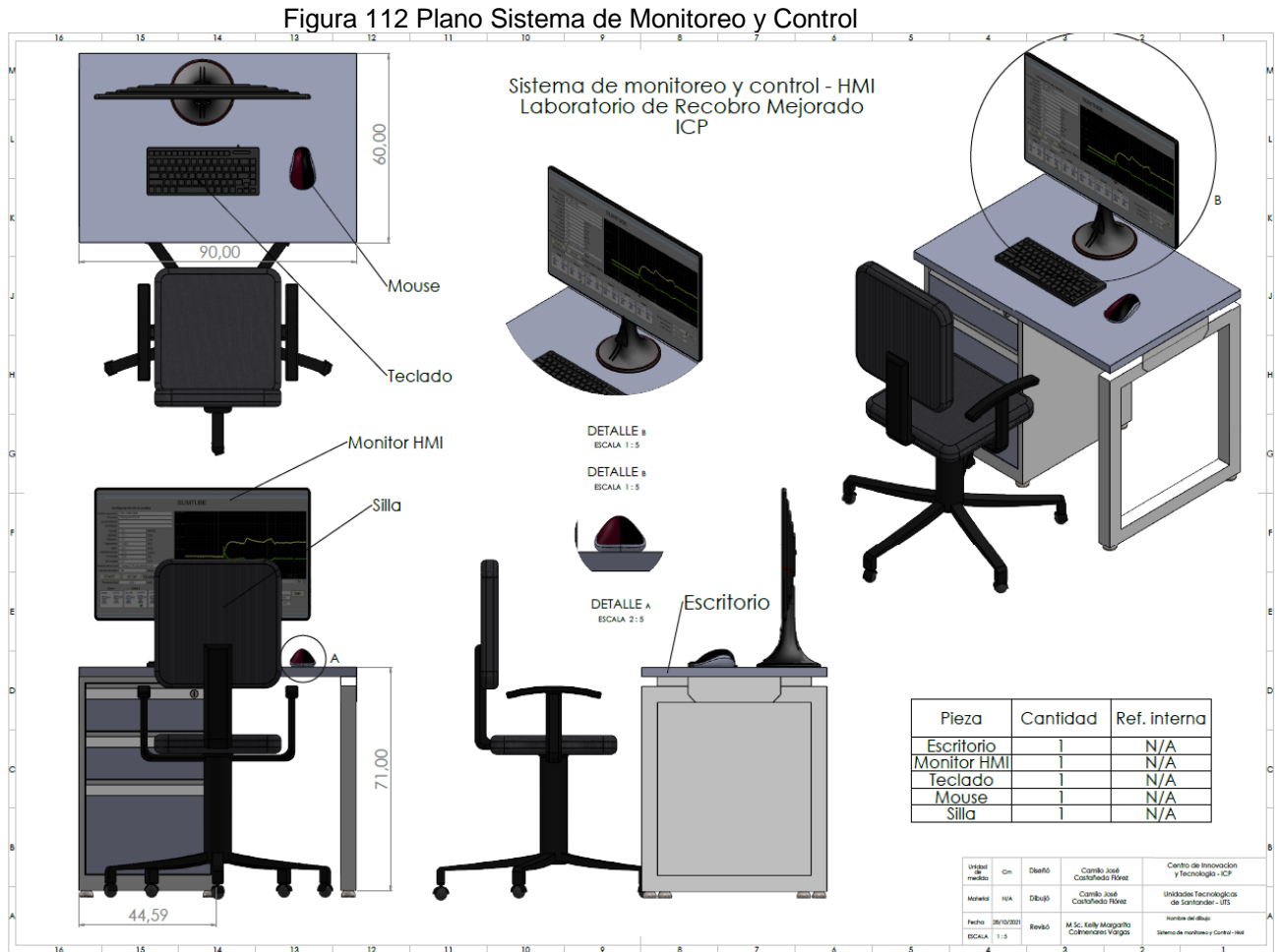
### 10.9. Anexo I – Plano de Base (modificada) de Sensores Smar

Figura 111 Plano Soporte (modificado) de Sensores Smar



Fuente: Autor

### 10.10. Anexo J – Plano del sistema de monitoreo y control



Fuente: Autor

**F-DC-125**

**INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO EN MODALIDAD DE PROYECTO  
DE INVESTIGACIÓN, DESARROLLO TECNOLÓGICO, MONOGRAFÍA,  
EMPRESARIADO Y SEMINARIO**

**VERSIÓN: 1.0**