



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL

Facultad de Ingeniería en Ciencias de la Tierra

**"REDISEÑO, AUTOMATIZACIÓN Y DIGITALIZACIÓN DE LOS DATOS
OBTENIDOS EN EL PERMEÁMETRO DE GAS DEL LABORATORIO DE
PETROFÍSICA FICT - ESPOL"**

PROYECTO DE GRADO

Previa a la obtención del Título de:

INGENIERO EN PETRÓLEO

Presentado por:

DANIEL ENRIQUE NAVARRETE DÍAZ

**GUAYAQUIL – ECUADOR
2017**

DEDICATORIA

A mis Padres Rafael Navarrete y Elena Díaz, por su cariño y siempre estar conmigo. A todos mis familiares, amigos y personas que me han acompañado en esta etapa de mi vida.

Daniel Enrique Navarrete Díaz

AGRADECIMIENTO

Al MSc. Romel Erazo Bone por la tutoría y consejos en el desarrollo del proyecto y a mis compañeros del proyecto multidisciplinario, gracias por compartir sus conocimientos.

Daniel Enrique Navarrete Díaz

TRIBUNAL DEL PROYECTO

MSc. Romel Ángel Erazo Bone
DIRECTOR DE MATERIA INTEGRADORA

MSc. Fidel Chuchuca Aguilar
MIEMBRO EVALUADOR

MSc. Fabián Vera Rosales
MIEMBRO EVALUADOR

DECLARACIÓN EXPRESA

“La responsabilidad del contenido de este Proyecto de Grado, me corresponde exclusivamente; y el patrimonio intelectual de la misma, a la Escuela Superior Politécnica del Litoral”

(Reglamento de Exámenes y Títulos Profesionales de la ESPOL)

Daniel Enrique Navarrete Díaz

RESUMEN

El presente trabajo trata sobre el rediseño y automatización del permeámetro de gas del laboratorio de petrofísica de la FICT, que se encuentra en mal estado y fuera de servicio. El objetivo de estudio es establecer una metodología que permita un rediseño del equipo, acompañado de la automatización de sus componentes y digitalización de los datos y resultados que se obtienen en pruebas de permeabilidad de muestras de rocas en el permeámetro de gas.

Inicialmente se presenta una revisión teórica sobre las propiedades petrofísicas de las rocas y conceptos de funcionamiento del permeámetro.

La metodología consta de cuatro pasos, como los requerimientos del encargado del laboratorio para el rediseño del equipo, el rediseño de las partes mecánicas del equipo, la automatización y digitalización del equipo y por último el rediseño y apariencia final del permeámetro de gas.

Como resultado se logró presentar un modelo del permeámetro de gas automatizado y con digitalización de los datos, que permite realizar pruebas de permeabilidad para tres diferentes tamaños de muestra y con dos diferentes gases como el Nitrógeno y Helio.

El rediseño y posterior implementación del equipo permitirá a los estudiantes de la carrera de Ingeniería en Petróleo poder realizar las debidas prácticas de permeabilidad de rocas en el laboratorio de petrofísica de la FICT y prestar servicios de laboratorio a empresas que lo requieran, convirtiendo a la ESPOL en la primera universidad de contar con este tipo de equipo de laboratorio automatizado.

Palabras Clave: Petrofísica, Permeabilidad, Gas, Inerte, Permeámetro, Automatizar.

ÍNDICE GENERAL

DEDICATORIA.....	II
AGRADECIMIENTO.....	Ij
Error! Marcador no definido.	
TRIBUNAL DEL PROYECTO.....	IV
DECLARACIÓN EXPRESA.....	V
RESUMEN.....	VI
ÍNDICE GENERAL.....	VII
ABREVIATURAS.....	XI
SIMBOLOGÍA.....	XII
ÍNDICE DE FIGURAS.....	XIV
ÍNDICE	DE
TABLAS.....	Xj Error!
Marcador no definido.	
CAPÍTULO 1.....	18
INTRODUCCIÓN.....	18
1. Introducción.....	19
1.1. Descripción del problema.....	19
1.2. Objetivos.....	21

1.2.1.	Objetivo General.....	21
1.2.2.	Objetivos Específicos.....	22
1.3.	Marco teórico.....	22
1.3.1.	Propiedades Físicas del Medio Poroso.....	22
1.3.1.1.	Porosidad.....	22
1.3.1.1.1.	Porosidad Absoluta.....	23
1.3.1.1.2.	Porosidad Efectiva.....	23
1.3.1.1.3.	Porosidad no Efectiva.....	24
1.3.1.2.	Saturación de Fluidos.....	24
1.3.1.3.	Permeabilidad.....	24
1.3.1.3.1.	Permeabilidad Absoluta.....	25
1.3.1.3.2.	Permeabilidad Efectiva.....	25
1.3.1.3.3.	Permeabilidad Relativa.....	26
1.3.2.	Métodos para determinar la Permeabilidad.....	26
1.3.2.1.	Uso de Registros Eléctricos.....	27
1.3.2.2.	Correlaciones.....	28
1.3.2.3.	Usando datos de campo.....	29
1.3.2.4.	Métodos de Laboratorio de Petrofísica.....	29
1.3.3.	Principios de Funcionamiento del Permeámetro de Gas.....	30
1.3.3.1.	Núcleos de Muestra.....	31
1.3.3.2.	Stress de confinamiento.....	32
1.3.3.3.	Ley de Darcy.....	32

1.3.3.4. Efecto Klinkenberg.....	35
1.3.3.5. Ecuación de permeabilidad utilizando gases en estado estacionario.....	37
1.3.4. Sistemas de Funcionamiento del permeámetro de gas automatizado.....	38
1.3.4.1. Sistema de Presión.....	39
1.3.4.2. Sistema de Temperatura.....	39
1.3.4.3. Sistema de Flujo.....	40
1.3.4.4. Sistema de sujeción y soporte.....	41
1.3.4.5. Válvulas, reguladores y accesorios.....	42
CAPÍTULO 2.....	43
METODOLOGÍA	43
2.1. Requerimientos para el Diseño del Equipo.....	45
2.2. Metodología del Diseño del Equipo.....	45
2.2.1. Sistema de medición de temperatura.....	49
2.2.1.1. Alternativas de medición de temperatura.....	50
2.2.1.2. Evaluación de las alternativas de medición de temperatura.....	55
2.2.2. Sistema de medición de presión.....	58
2.2.2.1. Alternativas para medición de presión.....	58
2.2.2.2. Evaluación de las alternativas para medición de presión.....	60
2.2.3. Sistema de medición de flujo.....	63
2.2.3.1. Alternativas para medir el flujo de gas.....	63

2.2.3.2. Evaluación de las alternativas para medir el flujo de gas.....	66
2.2.4. Gases inertes.....	69
2.2.4.1. Alternativas de gases inertes.....	69
2.2.4.2. Evaluación de las alternativas de gases.....	71
2.3. Metodología de la Automatización y digitalización del equipo.....	74
2.4. Diseño Final del Permeámetro de gas.....	77
CAPÍTULO 3.....	79
RESULTADOS.....	79
3.1. Diagrama del Permeámetro de gas.....	80
3.2. Rediseño del Permeámetro de gas.....	82
3.2.1. Rediseño Sistema de Temperatura.....	82
3.2.2. Rediseño Sistema de Presión.....	83
3.2.3. Rediseño Sistema de Flujo.....	86
3.2.4. Rediseño del Portanúcleo.....	89
3.2.5. Accesorios y tubería.....	90
3.3. Modelo final del permeámetro de gas automatizado.....	94
3.4. Cálculos de permeabilidad y resultados.....	96
3.5. Análisis de costos.....	99
CAPÍTULO 4.....	104
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	104
CONCLUSIONES.....	105
RECOMENDACIONES.....	107

ANEXOS

BIBLIOGRAFÍA

ABREVIATURAS

AC	Corriente Alterna
API	American Petroleum Institute
DC	Corriente Continua
ESPOL	Escuela Superior Politécnica del Litoral
FICT	Facultad de Ingeniería en Ciencias de la Tierra
FTE	Sensor transmisor de caudal
HMI	Interfaz Hombre Maquina
MSc	Maestría en Ciencias
PLC	Controlador lógico programable
PTE	Sensor transmisor de presión
RP40	Recommended Practices for Core Analysis
SCL	Structured Control Language
TIA	Totally Integrated Automation
TTE	Sensor transmisor de temperatura

SIMBOLOGÍA

A	Área transversal del tapón muestra
atm	Atmósfera
°C	Grados Celsius
cc	Centímetro cúbico
cm	Centímetro
cm ²	Centímetro cuadrado
cp	Centipoise
F _R	Factor de formación
He	Helio
in	Pulgada
°K	Grados Kelvin
k	Permeabilidad Absoluta
k _g	Permeabilidad efectiva al gas
k _o	Permeabilidad efectiva al petróleo
k _w	Permeabilidad efectiva al agua
k _{rg}	Permeabilidad relativa al gas
k _{ro}	Permeabilidad relativa al petróleo
k _{rw}	Permeabilidad relativa al agua
L	Longitud del tapón muestra
md	Milidarcy
mm	Milímetro

mV	Milivoltio
N ₂	Nitrógeno
P	Presión
Psi	Libras por pulgada cuadrada
q	Caudal de flujo
R' _w	Resistividad del agua
R' _t	Resistividad total
s	Segundos
S _g	Saturación de gas
S _o	Saturación de petróleo
S _w	Saturación de agua
T	Temperatura
v	Velocidad aparente del fluido
V _p	Volumen poroso
V _t	Volumen total de roca
φ	Porosidad
μ	Viscosidad

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Relación entre permeabilidad, porosidad y saturación.....	27
Figura 1.2. Procedimiento de Laboratorio.....	31
Figura 1.3. Ley de Darcy.....	33
Figura 1.4. Representación esquemática del efecto Klinkenberg.....	36
Figura 2.1. Metodología de Trabajo.....	44
Figura 2.2. Sistemas que conforman el Permeámetro de Gas.....	47
Figura 2.3. RTD PT100.....	54
Figura 2.4. SDET.....	59
Figura 2.5. Transmisor de presión XMLP.....	60
Figura 2.6. Controlador.....	75
Figura 2.7. HMI SIMATIC PANEL.....	76
Figura 2.8. Metodología de Diseño.....	78
Figura 3.1. Diagrama del Permeámetro de Gas.....	81
Figura 3.2. Permeámetro de Gas Ruska.....	81
Figura 3.3. Sistema de medición de temperatura.....	83

Figura 3.4. Sistema para paso de gas.....	86
Figura 3.5. Sistema de medición de presión.....	86
Figura 3.6. Sensor de flujo seleccionado.....	88
Figura 3.7. Portanúcleo.....	90
Figura 3.8. Modelo del permeámetro de gas automatizado.....	95
Figura 3.9. Gráfica Permeabilidad vs La inversa de presión promedio.....	98

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla I. Parámetro cualitativo.....	47
Tabla II. Características Técnicas.....	48
Tabla III. Termómetro de vidrio.....	50
Tabla IV. Termopar.....	51
Tabla V. Criterios para alternativas de medición de temperatura.....	55
Tabla VI. Matriz de decisión para la medición de Temperatura.....	57
Tabla VII. Criterios para alternativas de medición de presión.....	61
Tabla VIII. Matriz de decisión para medir la presión.....	62
Tabla IX. Criterios para alternativas de medición de flujo.....	66
Tabla X. Matriz de decisión para medir el flujo de gas.....	68
Tabla XI. Criterios de alternativas de gases.....	71
Tabla XII. Matriz de decisión para gases.....	73
Tabla XIII. Características del Controlador.....	75
Tabla XIV. Características del HMI SIMATIC PANEL.....	76
Tabla XV. Datos técnicos de PT100 sensor.....	82

Tabla XVI. Parámetros para electroválvulas.....	84
Tabla XVII. Parámetros para válvula proporcional de presión.....	84
Tabla XVIII. Datos técnicos del sensor de presión.....	85
Tabla XIX. Datos del sensor de flujo.....	87
Tabla XX. Escalamiento de datos.....	88
Tabla XXI. Tamaño de muestras.....	89
Tabla XXII. Dimensiones de tubería.....	91
Tabla XXIII. Elección de racores.....	92
Tabla XXIV. Tipos de racores.....	93
Tabla XXV. Permeabilidad y Presión promedio.....	97
Tabla XXVI. Análisis de costos.....	99
Tabla XXVII. Total.....	103

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

1. INTRODUCCIÓN

La función principal de los distintos laboratorios de las unidades académicas es comprobar la parte teórica por medio de modelos a escalas o equipos que representen los principios o fenómenos estudiados en clases, para que el estudiante tenga la capacidad para aportar con soluciones en el caso dado.

Con este proyecto se busca mejorar los equipos del laboratorio de petrofísica de la FICT en este caso el permeámetro de gas que actualmente se encuentra en mal estado y fuera de servicio. El equipo nos permite calcular la permeabilidad, una de las principales variables necesarias en casi todas las áreas de estudio de la ingeniería de petróleos.

El rediseño y automatización del equipo permitirá al estudiante obtener mediciones de permeabilidad con menos errores y datos más confiables.

Los beneficiarios son los estudiantes de la carrera de ingeniería de petróleo, las empresas petroleras que soliciten el servicio del laboratorio de petrofísica de la FICT y la universidad ESPOL por contar con el primer permeámetro de gas automatizado.

1.1. Descripción del problema

Los laboratorios petrofísicos permiten realizar análisis de alta calidad y confiabilidad a las propiedades de las rocas existentes en los yacimientos y desarrollar estrategias adecuadas de producción. En el desarrollo de

cualquier proyecto de producción de petróleo, la medición de la permeabilidad de las rocas aporta a una caracterización precisa del yacimiento así como a sus diseños de terminación y estimulación. Una adquisición inexacta del valor de este parámetro implica cálculos erróneos, imprecisiones y falsos supuestos que se acarrean en otras áreas, destinadas a determinar el comportamiento del yacimiento. (Al-Qarni, 2001)

El país ya cuenta con laboratorios petrofísicos modernizados, sin embargo hasta hoy los permeámetros automatizados de gas solo se encuentran disponibles a nivel de empresa, puesto que contar con un equipo de esta característica se limita por los recursos disponibles de las entidades educativas.

Actualmente la Escuela Superior Politécnica del Litoral cuenta con un laboratorio petrofísico ubicado en la Facultad de Ingeniería en Ciencias de la Tierra, el mismo que posee un déficit de equipos de medición, debido a la tecnología obsoleta con la cual están diseñados o el mal estado en que se encuentran por el descuido en su manipulación y la falta de mantenimiento. Esta situación se convierte en una limitante para el desarrollo de prácticas e investigaciones experimentales que se podrían realizar en el laboratorio. El permeámetro de gas es uno de los equipos

que no se encuentran habilitados y el cual permite medir la permeabilidad existente en una muestra de suelo rocoso. Cuenta con un funcionamiento totalmente manual, lo que maximiza el tiempo y el error en el proceso de medición y está diseñado para un determinado tamaño estándar de muestra rocosa.

El permeámetro de gas del laboratorio de petrofísica tuvo su inicio de operación en 1980 y a lo largo de los años ha sufrido procesos de rediseño empírico, cuenta con una infraestructura híbrida para acomodarlo a las condiciones de funcionamiento que brinda las instalaciones, lo que hace más complicado su manejo y repercute en la calidad de medición obtenida. (Iñiga, 2006)

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo General

Rediseñar el permeámetro de gas mediante la participación de las carreras de ingeniería en petróleo, mecánica y automatización, para que los estudiantes de la carrera de ingeniería en petróleo puedan determinar la permeabilidad de las rocas en el laboratorio de petrofísica de la FICT.

1.2.2. Objetivos Específicos

- Determinar los métodos matemáticos para calcular la permeabilidad.
- Determinar el patrón de funcionamiento del permeámetro para establecer el rediseño del equipo mediante la lógica funcional del proceso.
- Establecer el procedimiento para realizar las pruebas de permeabilidad utilizando el permeámetro de gas automatizado.

1.3. Marco teórico

1.3.1. Propiedades Físicas del Medio Poroso

1.3.1.1 Porosidad

La Porosidad es una medida del espacio intersticial (espacio existente entre grano y grano de la roca), y se define como la relación entre el volumen poroso y el volumen total de la roca. Se representa con el símbolo ϕ y matemáticamente se expresa:

$$\phi = \frac{V_p}{V_t}, \text{ donde} \quad \text{Ec.1.1}$$

V_p = volumen poroso.

V_t = volumen total de la roca.

La porosidad se puede expresar como fracción o porcentaje. Por la interconexión del volumen poroso se clasifica en porosidad absoluta, efectiva y no efectiva. (Escobar, 2004)

1.3.1.1.1 Porosidad Absoluta

Representa el volumen poroso de la roca esté o no interconectado. La roca puede tener una porosidad absoluta considerable y no tener conductividad de fluidos debido a carecer de poros interconectados. (Escobar, 2004)

1.3.1.1.2 Porosidad Efectiva

Se define como la relación del volumen poroso interconectado con el volumen total de la roca. La porosidad efectiva es una indicación de la habilidad de la roca para conducir fluidos. Este tipo de porosidad se mide usualmente en el laboratorio y se usa en cálculos de flujo de fluidos. (Craft, 1991)

1.3.1.1.3 Porosidad no Efectiva

Se define como la diferencia que existe entre la porosidad absoluta y la porosidad efectiva. (Escobar, 2004)

1.3.1.2 Saturación de Fluidos

La Saturación representa la cantidad de fluido que satura el medio poroso. Si se conoce dicha cantidad y la extensión del volumen poroso, podemos volumétricamente determinar cuánto del fluido hay en una roca. (Escobar, 2004) El símbolo para la Saturación es S y se expresa en fracción o porcentaje. La suma de todas las Saturaciones de los fluidos presentes en el medio poroso equivale a la unidad.

$$S_o + S_w + S_g = 1 \quad \text{Ec.1.2}$$

1.3.1.3 Permeabilidad

La Permeabilidad se puede definir como la capacidad que tiene la roca para permitir el flujo de fluidos a través de los poros interconectados. Se representa simbólicamente con la letra k y se mide en una unidad arbitraria llamada Darcy, por Henry Darcy, quien estudio

el flujo de agua a través de filtros de arena a mediados del siglo XIX.

La Permeabilidad se puede clasificar en absoluta, efectiva y relativa.

1.3.1.3.1 Permeabilidad Absoluta

Es aquella Permeabilidad que se mide cuando un fluido satura el 100% del espacio poroso. Normalmente, el fluido de prueba es aire o agua. (Escobar, 2004)

1.3.1.3.2 Permeabilidad Efectiva (k_e)

Es la medida de la permeabilidad a un fluido que se encuentra en presencia de otro u otros fluidos que saturan el medio poroso. (Escobar, 2004)
Esta permeabilidad es función de la saturación del fluido considerado y como es lógico suponer, será siempre menor que la permeabilidad absoluta. (Rodríguez, 2007)

Se representa k_o , k_w y k_g como las permeabilidades efectivas para el petróleo, agua y gas respectivamente.

1.3.1.3.3 Permeabilidad Relativa (k_{ri})

Es la relación existente entre la permeabilidad efectiva y la permeabilidad absoluta.

$$k_{ri} = \frac{k_e}{k} \quad \text{Ec.1.3}$$

Dependiendo del fluido la permeabilidad relativa se expresa:

$$k_{ro} = \frac{k_o}{k} \quad \text{Ec.1.4}$$

$$k_{rw} = \frac{k_w}{k} \quad \text{Ec.1.5}$$

$$k_{rg} = \frac{k_g}{k} \quad \text{Ec.1.6}$$

La suma de las permeabilidades relativas para los fluidos presentes en el medio poroso es menor de 1.

1.3.2 Métodos para determinar la Permeabilidad

A continuación se presentan los métodos más completos para determinar la permeabilidad de rocas.

1.3.2.1 Uso de Registros Eléctricos

Se determina la permeabilidad por medio de la porosidad y la saturación de agua intersticial. La porosidad la obtenemos de registros de densidad, sísmico o neutrónico y la saturación de agua intersticial a partir de un registro de resistividad, utilizando la ecuación de Archie:

$$S = \sqrt{\frac{F_R R'_W}{R'_t}} \quad \text{Ec.1.7}$$

F_R = Factor de formación

R'_w = Resistividad del agua intersticial

R'_t = Resistividad total (roca, agua y petróleo)

Utilizando la gráfica que relaciona estas tres propiedades obtenemos la permeabilidad. (Iñiga, 2006)

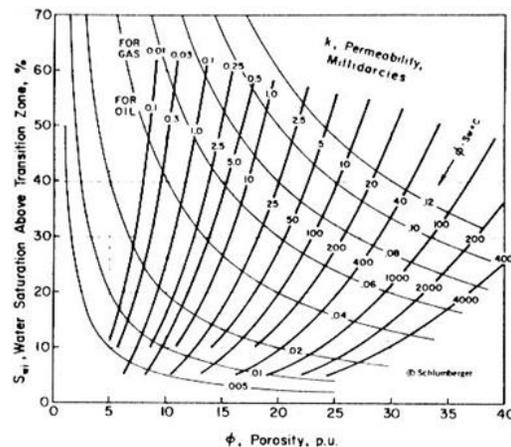


Figura 1.1. Relación entre permeabilidad, porosidad y saturación.
Fuente: Serra, O., 1984.

1.3.2.2 Correlaciones

Las correlaciones que se presentan, nos sirven para calcular las permeabilidades relativas:

- Corey.- Utiliza las siguientes ecuaciones:

$$k_{rg} = \left[1 - \frac{S_L - S_{LR}}{S_m - S_{LR}}\right]^2 \left[1 - \frac{S_L - S_{LR}}{1 - S_{LR}}\right]^2 \quad \text{Ec.1.8}$$

$$k_{ro} = \left[\frac{S_L - S_{LR}}{1 - S_{LR}}\right]^4 \quad \text{Ec.1.9}$$

Donde S_L es la saturación total de líquido, S_m es la saturación mínima de petróleo en la cual la fase de gas es discontinua, y S_{LR} es la saturación residual de líquido.

- Pirson.- Utiliza las siguientes ecuaciones:

$$k_{rw} = (S^*)^{1/2} (R'_o / R'_t)^2 \quad \text{Ec.1.10}$$

$$k_{ro} = (1 - S_{wm})^2 \quad \text{Ec.1.11}$$

Donde S_{wm} es igual a $(S_w - S_{wirr}) / (1 - S_{wirr} - S_{or})$; S_w^* es $(S_w - S_{wirr}) / (1 - S_{wirr})$; R'_o y R'_t son las resistividades de la formación saturada completamente con agua y la verdadera, respectivamente.

- Jones.- Utiliza las siguientes ecuaciones:

$$k_{rw} = (S_w^*)^3 \quad \text{Ec.1.12}$$

$$k_{ro} = \left[\frac{(0.9 - S_w)}{(0.9 - S_{wi})} \right]^2 \quad \text{Ec.1.13}$$

Donde S_w^* es el mismo del método anterior. (Iñiga, 2006)

1.3.2.3 Usando datos de campo

Determinamos las permeabilidades relativas utilizando los datos obtenidos en campo, mediante el uso de software, a partir de ecuaciones de balance de materiales.

1.3.2.4 Métodos de Laboratorio de Petrofísica

Para los métodos de laboratorio utilizamos equipos especializados para medir permeabilidad llamados permeámetros.

- Permeámetro de Líquidos.- Permite medir permeabilidades absolutas de núcleos consolidados a partir de la utilización de líquidos inertes con relación al material de la muestra. Su principio de funcionamiento se fundamenta en la aplicación de la ley de Darcy para flujo lineal, homogéneo y estable.

Se mide el tiempo que le toma a un volumen de líquido pasar a través del medio poroso de una muestra de dimensiones conocidas a una presión y temperatura dada, para luego calcular su permeabilidad.

- Permeámetro de Gas.- Permite medir permeabilidades absolutas, mediante el flujo de un gas inerte con las muestras. Al igual que el permeámetro de líquido se fundamenta en la aplicación de la ley de Darcy.

1.3.3 Principios de Funcionamiento del Permeámetro de Gas

Se permite el paso de un gas a través del medio poroso del núcleo de muestra, controlando una diferencia de presiones, se registra la cantidad de fluido que atraviesa la muestra (tasa de flujo volumétrico) en un determinado tiempo, conociendo las medidas de longitud del núcleo, su área transversal y la viscosidad del gas utilizado, se procede a determinar la permeabilidad a partir de la Ley de Darcy.

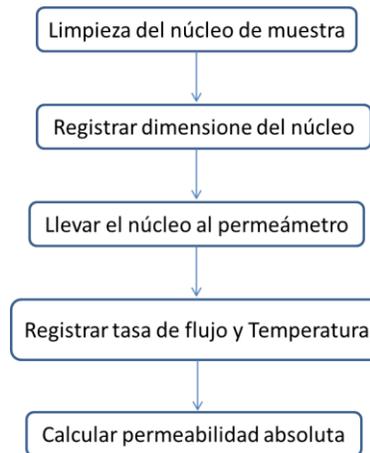


Figura 1.2. Procedimiento de Laboratorio.

Fuente: Navarrete, D., 2017.

1.3.3.1 Núcleos de Muestra

La longitud y diámetros de los núcleos son diversos, depende del tamaño y volumen del núcleo a utilizar para el debido análisis de laboratorio.

Para el análisis de laboratorio se utiliza una cortadora o taladradora con una barrena de diamante para perforar las muestras de núcleo. Se obtiene un cilindro vertical con medidas estándares de 38 mm (1,5”) de diámetro y 64 mm (2,5”) de largo, con caras planas en los extremos. (Andersen, 2013)

Para este proyecto se va a variar el tamaño de las dimensiones de los tapones de muestra.

Para el análisis de permeabilidad de la muestra, primero se debe realizar la debida limpieza y extracción de fluidos del tapón de muestra, ya que el espacio poroso de la roca debe estar libre de fluidos, que afecten las mediciones de las propiedades del medio.

1.3.3.2 Stress de confinamiento

Al stress de confinamiento lo definimos como la suma de todas las fuerzas que actúan sobre la roca, modificando su permeabilidad. (Lache, 2008) Para el análisis de laboratorio se implementa un dispositivo de confinamiento que simule las presiones en el pozo (celda porta núcleo), y de esta manera aproximarse a las condiciones de ambiente deseado.

1.3.3.3 Ley de Darcy

En 1856 Henry Darcy experimentó el flujo de agua purificada a través de filtros de arena, y propuso una Ley que dice que “la velocidad de un fluido homogéneo en un medio poroso es directamente proporcional al gradiente de presión e inversamente proporcional a la viscosidad del fluido”. (Escobar, 2004)

Para que se cumpla esta Ley, se requiere que el fluido se adhiera a los poros de la roca, saturación del 100% y que el flujo sea laminar.

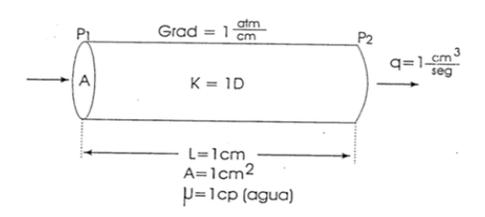


Figura 1.3. Ley de Darcy.
Fuente: Rodríguez, J., 2007.

Tenemos como ecuación:

$$v = \frac{kdp}{\mu dx} \quad \text{Ec.1.14}$$

En términos de tasa de flujo volumétrico q

$$q = vA = -\frac{kAdp}{\mu dx} \quad \text{Ec.1.15}$$

Dónde:

k = permeabilidad del medio poroso, medida en darcys

v = velocidad aparente del fluido, medida en cm/s

q = tasa de flujo volumétrico, medida en cc/s

A = área transversal, medida en cm^2 $A = \pi r^2 = \pi \frac{d^2}{4}$

Ec.1.16

μ = viscosidad del fluido, medida en centipoise (cp)

dp/dx = gradiente de presión en la dirección de flujo,
medida en atm/cm

Para el flujo lineal, el área es constante y la ecuación se puede integrar para diferenciales de presión y longitud:

$$\int_{p_1}^{p_2} \frac{kdp}{\mu} = -\frac{q}{A} \int_0^L dx \quad \text{Ec.1.17}$$

Si asumimos que k , μ y q son términos independientes de presión, la ecuación nos queda:

$$\int_{p_1}^{p_2} dp = -\frac{q\mu}{kA} \int_0^L dx \quad \text{Ec.1.18}$$

Integrando nos da:

$$p_2 - p_1 = -\frac{q\mu}{kA} L \quad \text{Ec.1.19}$$

Despejando la tasa de flujo volumétrico:

$$q = \frac{kA(p_1 - p_2)}{\mu L} \quad \text{Ec.1.20 (Beggs, 1991)}$$

Un darcy nos indica una alta permeabilidad, pero la mayor parte de rocas de reservorio tienen permeabilidades menores a 1 darcy, por lo tanto en unidades de campo se utiliza el milidarcy (md).

1darcy = 1000 md, para otras unidades de conversión:

$$1\text{darcy} = 9.869 \times 10^{-9} \text{ cm}^2 = 9.869 \times 10^{-13} \text{ m}^2 = 1.062 \times 10^{-11} \text{ ft}^2$$

En la Ingeniería de Petróleos la Ley de Darcy está muy ligada en el cálculo de las permeabilidades absolutas de las rocas de reservorios.

1.3.3.4 Efecto Klinkenberg

Aunque este fenómeno no se presenta a menudo en los campos petroleros, puede ser común en los laboratorios, donde a bajas presiones la molécula de gas puede tener el mismo tamaño que el de los poros por lo que no se presenta un perfil de flujo o no existe flujo viscoso. Para el caso de los gases, el fluido no se pega a la pared de los poros como requiere la ley de Darcy y un fenómeno llamado deslizamiento toma lugar. Este desplazamiento del fluido a lo largo de los poros sugiere una aparente dependencia de la permeabilidad con la presión. (Escobar, 2004)

En estos casos se realiza una extrapolación a presión infinita de la permeabilidad al gas medida a diferentes presiones promedio.

Absolute Permeability

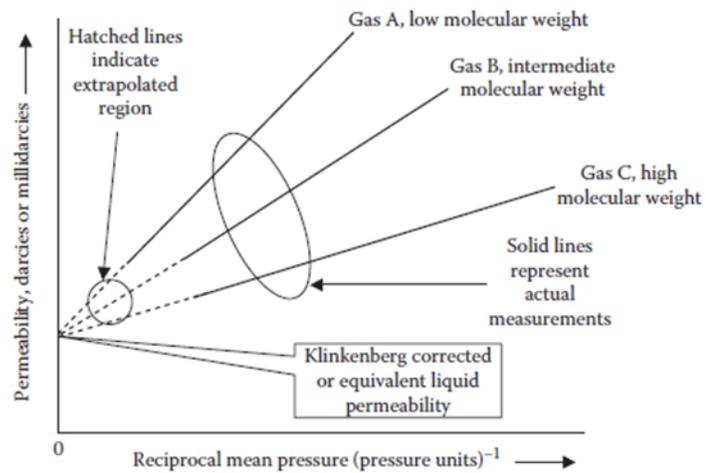


Figura 1.4. Representación esquemática del efecto Klinkenberg.

Fuente: Dandekar, A., 2013.

Para este efecto se utiliza la siguiente correlación matemática:

$$k_{gas} = k_{líquido} + m \left[\frac{1}{P_m} \right] \quad \text{Ec.1.21}$$

k_{gas} = medida de permeabilidad del gas

$k_{líquido}$ = equivalente a la permeabilidad de líquido

m = pendiente de la línea de extrapolación

$$P_m = \text{Presión promedio} \quad P_m = (P_1 + P_2)/2 \quad \text{Ec.1.22}$$

1.3.3.5 Ecuación de permeabilidad utilizando gases en estado estacionario

La ley de Darcy es aplicable para flujo lineal de fluidos incompresibles, como el permeámetro de estudio utiliza gas, que es un fluido compresible, existen ciertas variaciones en la ecuación utilizada para determinar la permeabilidad.

Ya que para el análisis de permeabilidad absoluta, utilizamos gases inertes como nitrógeno, helio, etc. a presiones bajas comparadas con las condiciones de presiones de reservorio, la ecuación de Darcy para obtener medidas de permeabilidad absoluta en el permeámetro de gas utilizado en el laboratorio sufre las siguientes modificaciones:

Primero utilizamos la ley de Boyle para igualar presiones y tasas de flujo volumétrico de entrada y de salida

$$q_1 P_1 = q_2 P_2 \text{ (Temperatura constante)} \quad \text{Ec.1.23}$$

Esta ecuación también se puede igualar a presión y tasa de flujo promedio, obteniendo:

$$q_1 P_1 = q_2 P_2 = q_m P_m \quad \text{Ec.1.24}$$

La ecuación de Darcy también se puede dejar en términos de tasa de flujo promedio:

$$q_m = \frac{kA(p_1 - p_2)}{\mu L} \quad \text{Ec.1.25}$$

Igualando la ecuación 1.24 y 1.25 para tasa de flujo de salida obtenemos:

$$\frac{q_2 P_2}{P_m} = \frac{kA(P_1 - P_2)}{\mu L} \quad \text{Ec.1.26}$$

Conociendo que $P_m = (P_1 + P_2)/2$ y despejando la tasa de flujo de salida obtenemos que:

$$q_2 = \frac{kA(P_1^2 - P_2^2)}{2\mu L P_2} \quad \text{O} \quad k = \frac{2q_2 \mu L P_2}{A(P_1^2 - P_2^2)} \quad \text{Ec.1.27}$$

Donde q_2 es la tasa de flujo medida a la salida en cc/s.

k es la permeabilidad absoluta medida a gas en darcy

A es el área transversal del tapón muestra en cm^2

μ es la viscosidad del gas, medida en centipoise (cp)

L es el largo del tapón muestra en cm

P_1 es la presión medida a la entrada en atm

P_2 es la presión medida a la salida en atm (Dandekar, 2013)

1.3.4 Sistemas de Funcionamiento del Permeámetro de gas automatizado

1.3.4.1 Sistema de Presión

El sistema está conformado por una válvula reguladora (manual o eléctrica) en la entrada del circuito del equipo con la finalidad de garantizar un valor de presión que se encuentre dentro del rango de trabajo y de esta forma variar el flujo volumétrico de gas que ingresará al equipo, además tener la facilidad de realizar un barrido de presión y obtener la permeabilidad corregida (efecto Klinkenberg). La medida de presión se obtiene por medio de un sensor a la entrada del portanúcleos enviando la señal al controlador y a la vez al regulador formando un sistema de lazo cerrado, dentro del circuito también se puede agregar un manómetro que se activa manualmente o por medio del controlador dependiendo del diseño del permeámetro.

1.3.4.2 Sistema de Temperatura

En el sistema las mediciones de Temperatura nos van a permitir determinar la viscosidad del gas utilizado, variable necesaria para los cálculos de permeabilidad. El circuito está constituido por un sensor en la entrada del

portanúcleos cuya señal censada es enviada al controlador, para luego mediante tablas o ecuaciones que relacionan Temperatura y viscosidad, registrar el dato de viscosidad.

La norma API RP40 sección 6 nos indica las tablas y ecuaciones a utilizar de relación Temperatura y viscosidad para distintos gases inertes. Por ejemplo:

$$\mu_{helio} = 187.0 \left(\frac{T}{273.1} \right)^{0.685} \quad \text{Ec.1.28}$$

Donde:

T = Temperatura absoluta en °K

μ_{helio} = Viscosidad del Helio en micropoise

$$\mu_{N_2} = \frac{13.85 T^{1.5}}{T+102} \quad \text{Ec.1.29}$$

Donde:

T = Temperatura absoluta en °K

μ_{N_2} = Viscosidad del Nitrógeno en micropoise (API-RP40, 1998)

1.3.4.3 Sistema de Flujo

El sistema está constituido por uno o varios medidores de flujo antes del portanúcleos, donde los valores censados pueden ser tomados por equipos sencillos

desde rotámetros hasta sensores electrónicos como caudalímetros, registrando el flujo volumétrico del gas a través del medio poroso de la muestra.

1.3.4.4 Sistema de sujeción y soporte

Este sistema consiste en el portanúcleos, lugar donde se ubica la muestra, su diseño está constituido en función al tamaño de núcleo y depende de los esfuerzos de confinamiento. La norma API RP40 sugiere que para bajas presiones de confinamiento se utilice un núcleo tipo Hassler en el cual se aplica un esfuerzo restrictivo radial de 400 psi y un esfuerzo axial de magnitud desconocida por medio de una prensa.

Para esfuerzos restrictivos elevados se utiliza un soporte de núcleo que permite emplear esfuerzos hidrostáticos, típicamente hasta un máximo de 10000psi.

1.3.4.5 Válvulas, reguladores y accesorios

Se toma en consideración otros componentes necesarios para el diseño del equipo, como válvulas solenoides, válvula de purga, válvulas de paso manual, codos, abrazadera, mangueras, retenedores y otros accesorios que sus usos dependen de la función a cumplir en el diseño del equipo.

CAPÍTULO 2

METODOLOGÍA



Figura 2.1. Metodología de Trabajo.
Fuente: Navarrete, D., 2017.

2.1 Requerimientos para el Diseño del Equipo

Para el rediseño del permeámetro de gas automatizado, se presentan las principales características que se requieren:

- Realizar la práctica de laboratorio de permeabilidad, utilizando diferentes tipos de gases para un mismo núcleo.
- Realizar la práctica de permeabilidad para distintos tamaños de muestra de núcleo.
- Determinar la permeabilidad corregida (considerando el efecto Klinkenberg).
- Aumentar el rango de presión de trabajo.
- Predisponer que los elementos a utilizar en la construcción del equipo se encuentren disponibles en el mercado.
- La instrumentación utilizada debe estar en perfecto estado y en buenas condiciones, para disminuir la necesidad de realizar mantenimiento en periodos cortos.

2.2 Metodología del Diseño del Equipo

Para el rediseño del permeámetro de gas es factible dividir el equipo por sistemas, de acuerdo a las variables a medir y al resto de los elementos que lo componen.

Para cada sistema se presentan diferentes alternativas de elección, mediante la utilización de matrices de decisión, se escoge o elige, la o las alternativas que nos permitan definir los elementos a utilizar para el diseño del permeámetro de gas automatizado.

La evaluación consiste en un análisis comparativo de las alternativas propuestas, un método para desarrollar la selección es mediante la matriz de decisión, lo que implica haber previamente definido criterios para poder cuantificar y escoger. Mediante la matriz de decisión se determina cuáles son los puntos fuertes y limitaciones que presenta cada alternativa.

Un modelo de matriz de decisión propuesta por Norton indica que cada alternativa ocupa una columna en la matriz y las filas representan los criterios de evaluación de los diseños; además, cada criterio tiene asignado un factor de ponderación para medir su importancia. El cuerpo de la matriz se llena de números y letras de acuerdo al rango cualitativo, para luego clasificar a cada diseño en una escala conveniente y subjetiva, luego cada calificación se multiplica por los factores de ponderación, y los productos son sumados para cada diseño. Por último, se incluye una fila de los resultados en términos porcentuales. (Norton, 2012).

Tabla I. Parámetro cualitativo.

PARÁMETRO CUALITATIVO	REPRESENTACIÓN	VALOR
Muy bueno	MB	4
Bueno	B	3
Regular	R	2
Malo	M	1

Fuente: Villegas, J., 2017.

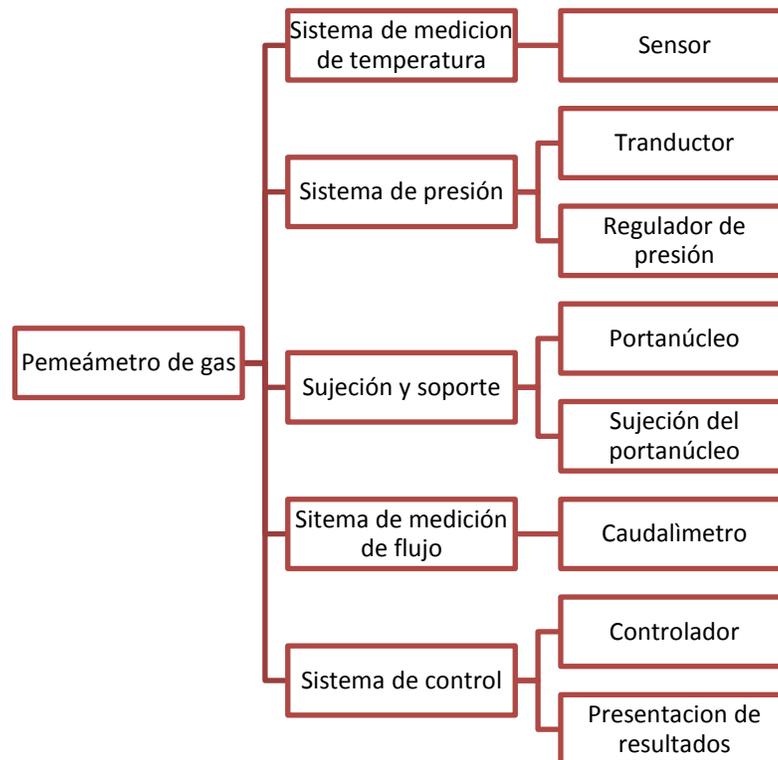


Figura 2.2. Sistemas que conforman el Permeámetro de Gas.

Fuente: Villegas, J., 2017.

A continuación se presenta una tabla con las características técnicas para cada sistema, estas características se determinaron buscando información sobre permeámetros de gas automatizados (para estado estable), y considerando rangos de funcionamiento de temperatura, presión y flujo volumétrico, requerimientos presentes en la Norma API RP40 sección 6.

Tabla II. Características Técnicas.

Tipo de sistema	Características		
Sistema de medición de temperatura	Rango de temperatura	14°C – 40°C	
	Tipo de Sensor	RTD Termistor Termocupla Semiconductor	
Sistema de medición de presión	Rango de presión	0-145 psi	
	Sensor o Transductor	Tipo	Piezorresistivo Galgas extensiométrica
		Precisión: 0.1% FS	

	Regulador de presión	Para bombona de gas y entrada del circuito
Sistema de medición de flujo	Medidor de flujo	Rango: 0-50 cc/min, 0-400 cc/min, 0-3000 cc/min Precisión: 1% FS
	Tipo de fluido de trabajo	Nitrógeno, helio y aire
Sistema de control	Computadora con DAQ o PLC con HMI	
Sistema de sujeción y soporte	Dimensiones portanúcleo	Diámetro: 1 in – 1.5 in Longitud: 3 in – 4 in
	Formas de confinar la cámara del portanúcleo	<ul style="list-style-type: none"> • Bomba de desplazamiento • Prensa

Fuente: Villegas, J., 2017.

2.2.1 Sistema de medición de temperatura

Para la generación de alternativas con respecto a las características que debe tener el sistema de medición de temperatura se toma en cuenta los valores definidos por la tabla II.

2.2.1.1 Alternativas de medición de temperatura

Alternativa a: Termómetro de vidrio

Tubo o depósito de vidrio que contiene una sustancia cuya característica principal es su alta expansión térmica ante cambios de temperatura, los principales son:

Tabla III. Termómetro de vidrio.

Sustancia	Márgenes de trabajo
Mercurio	-35°C hasta 280°C
Pentano	-200°C hasta 20°C
Alcohol	-110°C hasta 50°C
Tolueno	-70°C hasta 100°C

Fuente: Creus, A., 2011.

La lectura de Temperatura es tomada directamente por el operador.

Alternativa b: Termocupla

Es la unión de dos metales cuyos extremos se encuentran a diferentes temperaturas la cual se genera una corriente de circulación. Esta circulación se basa en dos efectos termoeléctricos combinados. (Creus, A., 2011)

Efecto Peltier: Al existir contacto entre dos metales se induce una fem.

Efecto Thompson: Al existir un gradiente de temperatura en uno o ambos materiales, se genera una fem.

Para ciertas aleaciones metálicas existe una relación lineal entre el voltaje generado y la temperatura, dando paso a diferentes tipos de termocuplas disponible en el mercado, a continuación, se muestra en una tabla el rango de temperatura de trabajo y las tolerancias para un tipo de termopar determinado. (Creus, A., 2011)

Tabla IV. Termopar.

TERMOPAR	CLASE 1	CLASE 2	CLASE 3	Temperatura de trabajo
Tipo E Ni Cr/Cu Ni	$\pm 1.5^{\circ}\text{C}$ -40°C a 800°C	$\pm 2.5^{\circ}\text{C}$ -40°C a 900°C	$\pm 2.5^{\circ}\text{C}$ -200°C a 40°C	-200°C a 915°C
Tipo T Cu/Cu Ni	$\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ -40°C a 350°C	$\pm 1^{\circ}\text{C}$ -40°C a 350°C	$\pm 1.0^{\circ}\text{C}$ -200°C a 40°C	-200°C a 400°C
Tipo J Fe/Cu Ni	$\pm 1.5^{\circ}\text{C}$ -40°C a 750°C	$\pm 2.5^{\circ}\text{C}$ -40°C a 750°C	.....	-200°C a 1200°C

Tipo K	$\pm 1.5^{\circ}\text{C}$	$\pm 2.5^{\circ}\text{C}$	$\pm 2.5^{\circ}\text{C}$	-200°C a
Ni Cr/Ni Al	-40°C a	-40°C a	-200°C a 40°C	1372°C
	1000°C	1200°C		
Tipo R	$\pm 1.0^{\circ}\text{C}$	$\pm 1.5^{\circ}\text{C}$	.....	-50°C a
Pt 13%	0°C a	0°C a		1768°C
Rh/Pt	1600°C	1600°C		
Tipo S	$\pm 1.0^{\circ}\text{C}$	$\pm 1.5^{\circ}\text{C}$	.....	-50°C a
Pt 10%	0°C a	-40°C a		1768°C
Rh/Pt	1600°C	800°C		
Tipo B	.....	$\pm 1.5^{\circ}\text{C}$	$\pm 4.0^{\circ}\text{C}$	0°C a
Pt 30%		600°C a	-600°C a	1820°C
Rh/Pt6%Rh		1700°C	1700°C	
Tipo N	$\pm 1.5^{\circ}\text{C}$	$\pm 2.5^{\circ}\text{C}$	$\pm 2.5^{\circ}\text{C}$	-270°C a
Ni Cr Si/Ni	40°C a	-40°C a	-200°C a 40°C	1300°C
Si Mg	1000°C	1200°C		

Fuente: Creus, A., 2011.

Este caso el tipo de termocupla que cumple con mejores características para implementar en el rediseño es la termocupla tipo T.

Alternativa c: RTD PT100

Es un sensor de temperatura resistivo basado en la variación de resistencia de un conductor en función de la temperatura.

Está constituido por un enrollamiento de hilo fino del conductor, bobinado entre capas de material aislante y protegido por un revestimiento ya sea de vidrio o cerámica.

Se caracterizan por tener una relación lineal entre la temperatura y la resistencia sin la necesidad de acondicionar la señal.

Los materiales que forman el conductor poseen un alto coeficiente de temperatura de la resistencia para que el instrumento sea muy sensible y estabilidad de las características durante la vida útil del material.

El elemento más común de esta familia de sensores es la sonda PT100, la cual tiene como conductor un alambre de platino, normalmente se consiguen encapsulados en la misma forma que las termocuplas dentro de un tubo de acero

inoxidable u otro material, en un extremo está el elemento sensible y en el otro está el terminal eléctrico de los cables protegido por una caja redonda de aluminio.



Figura 2.3. RTD PT100.
Fuente: www.alibaba.com.

Alternativa d: Sensor de temperatura de semiconductor

Es un circuito integrado hecho de silicio que puede contener un circuito de procesamiento para linealizar la señal o compensar pérdidas por lo que no requiere de etapas de linealización, amplificación ni compensación externa, se basa en funciones de transferencia la cual son proporcionales a la temperatura ya sea en grados Kelvin, Celsius o Fahrenheit.

El elemento más representativo en este tipo de sensores es LM35 cuenta con una sensibilidad nominal de 10mv.

2.2.1.2 Evaluación de las alternativas de medición de temperatura

Los criterios para seleccionar el tipo de medición de temperatura fueron hechos a una escala del 1 al 10, tomando en cuenta los requerimientos y necesidades del cliente.

Tabla V. Criterios para alternativas de medición de temperatura.

CRITERIO	DESCRIPCIÓN	PONDERACIÓN
Características técnicas	Se toma en cuenta la exactitud, tiempo de respuesta, deriva y linealidad.	9
Disponibilidad en el mercado	Se prioriza que los elementos se puedan conseguir mediante un distribuir o tienda electrónica en el país, salvo el caso que ningún componente cumpla con la condición se considera importarlo.	5

Costo	Se refiere a los costos del sensor y del sistema que conlleva implementar en caso de que lo requiera como acondicionar la señal	8
Automatización	Es uno de los objetivos principales del proyecto la cual considera si el elemento cumple con este enfoque y además si la compatibilidad es directa al PLC o se requiere más elementos.	7

Fuente: Villegas, J., 2017.

La mejor alternativa para censar temperatura es un RDT PT100.

A continuación se presenta la matriz de decisión:

Tabla VI. Matriz de decisión para la medición de Temperatura.
MATRIZ DE DECISIÓN PARA LA MEDICIÓN DE TEMPERATURA

	CRITERIOS	PONDERACIÓN		ALTERNATIVAS							
				Termómetro de vidrio		Termocupla J		LM 35		PT 100(RTD)	
MEDICIÓN DE LA TEMPERATURA	Características técnicas	9	31.0%	B	27	B	27	R	18	MB	36
	Disponibilidad en el mercado	5	17.2%	MB	20	B	15	B	15	B	15
	Costo	8	27.6%	B	24	R	16	MB	32	R	16
	Automatización	7	24.2%	M	7	B	21	B	21	B	21
	TOTAL	11	100%	78		79		86		88	
	Porcentaje	100%		67.2%		68.1%		74.1%		75.9%	
	Porcentaje entre las alternativas:			88.63%		89.8%		97.7%		100%	

Fuente: Villegas, J., 2017.

2.2.2 Sistema de medición de presión

2.2.2.1 Alternativas para medición de presión

Alternativa a: Sensor de presión SDET

Es un sensor piezoeléctrico la cual se basa en materiales cristalino que al deformarse por la acción de la presión generan un potencial eléctrico, se caracterizan por ser ligeros de pequeño tamaño y construcción robusta son adecuados para mediciones dinámicas donde su señal de respuesta varía linealmente con la presión, tienen la desventaja de ser sensibles a la temperatura, además su señal de salida es baja por lo que se necesita de amplificadores y acondicionadores de señal lo que puede introducir errores en la medición. (Creus Solé, 2011).

Los sensores SDET fabricados por la empresa FESTO se caracterizan por medir presión relativa, son ideales para la medición de líquidos como gases y además son compatibles con la señal de salida para el controlador (PLC).



Figura 2.4. SDET.
Fuente: FESTO, 2016.

Alternativa b: Sensor de presión Cerabar PMP11

Es un sensor piezorresistivo que se deriva de los sensores de galgas extensiométrica basado en una membrana de material semiconductor, debido a la presión, presenta una variación en la resistencia por la expansión y compresión, dando como resultado una señal eléctrica.

El sensor de presión PMP11 es capaz de medir presión relativa desde 1 bar hasta 40 bar utilizando como material de protección acero inoxidable 316L.

Alternativa c: Transmisor de presión OsiSense XMLP

Es un elemento de película delgada que pertenece a los sensores piezorresistivo, se caracterizan por reducir los niveles de ruido y coeficiente de temperatura dando una mayor precisión, funciona a temperaturas entre -30°C – 100°C , este tipo de transmisor mide presión relativa con

referencia a la presión atmosférica y ofrece una salida eléctrica ya sea en término de voltaje o corriente en un rango de valores estándares, están diseñado para que funcionen en circuitos hidráulicos, refrigeración y gases, se caracterizan por tener una facilidad en sus conexiones tanto eléctricas como neumáticas, el rango de presión de trabajo es de 0-10 bar (0-145 psi), tiene una precisión del $\pm 1\%$ FS y una vida útil de 10 millones de ciclos de funcionamiento.



Figura 0.5. Transmisor de presión XMLP.

Fuente: Scheneider Electric, 2016.

2.2.2.2 Evaluación de las alternativas para medición de presión

Con respecto a los criterios para seleccionar el tipo de sensor de presión, para esto se asumió una escala del 1

al 10, tomando en cuenta los requerimientos y necesidades del cliente.

Tabla VII. Criterios para alternativas de medición de presión.

CRITERIO	DESCRIPCIÓN	PONDERACIÓN
Precisión	Se considera la precisión deriva y linealidad del sensor	8
Disponibilidad en el mercado	Se prioriza que los elementos se puedan conseguir mediante un distribuidor o tienda electrónica en el país, salvo el caso que ningún componente cumpla con la condición se considera importarlo.	5
Costo	Se refiere a los costos del sensor y del sistema que conlleva implementar en caso de que lo requiera ya sea acondicionar la señal o convertir	9
Compatibilidad	Hace referencia si la señal emitida requiere más elementos para alimentar al controlador y que no exista problema con las condiciones de trabajo como rango de flujo, temperatura, etc.	6

Fuente: Villegas, J., 2017.

La mejor alternativa para obtener la presión es mediante un sensor piezorresistivo XMLP ya que las características técnicas en cuanto a precisión, estabilidad en el tiempo (deriva) son mejores, con respecto a la disponibilidad del mercado todos los elementos pueden ser adquiridos en el país.

Tabla VIII. Matriz de decisión para medir la presión.

MATRIZ DE DECISIÓN PARA SENSAR LA PRESIÓN									
MEDICIÓN DE PRESIÓN	CRITERIOS	PONDERACIÓN		ALTERNATIVAS					
				Sensor SDET		Sensor XMLP		Sensor PMP11	
	Características técnicas	8	%29	B	24	B	24	B	24
	Disponibilidad en el mercado	5	%19.4	B	15	M	20	B	15
	Costo	9	%25.8	R	18	B	27	B	27
Compatibilidad	6	%25.8	MB	24	M	24	MB	24	

	TOTAL	11	%100	81	95	90
		2				
	Porcentaje	%100		%72.32	%84.82	%80.36
	entre las alternativas:			%85.26	%100	%94.73

Fuente: Villegas, J., 2017.

2.2.3 Sistema de medición de flujo

2.2.3.1 Alternativas para medir el flujo de gas

Alternativa a: Regulador de presión proporcional NORGREN y medidor de flujo EI-FLOW

Regular la presión es una opción viable para poder controlar este parámetro y de esta manera realizar un barrido de al menos cinco datos que permita hallar la permeabilidad corregida, una consideración a tomar en cuenta es que la válvula reguladora debe ir colocada antes del medidor de flujo, mientras que el sensor de presión se lo ubica en la entrada del portanúcleo por lo cual si se regula a una presión determinada hay que analizar las pérdidas que existen al pasar por el medidor de flujo por lo cual es necesario un sistema de lazo

cerrado entre sensor-controlador-regulador. Se destaca la compatibilidad que tiene para trabajar con gases neutros, el rango de operación es de 0 a 174 psi, tienen una vida útil de más de 100 millones de ciclo, el cuerpo de la válvula está hecho de latón y acero inoxidable, el rango de temperatura con que trabaja es de 10°C a 50 °C lo cual no existe problema para implementarlo en el equipo. (Bronkhorst USA)

Alternativa b: Regulador de flujo manual con medidor de flujo EL-FLOW

En esta ocasión el parámetro a controlar es el flujo volumétrico donde la presión varía de forma proporcional al caudal (ver ley de Darcy) y ya no se requiere de un sistema de lazo cerrado porque las pérdidas de presión ya no son relevantes, el valor censado se toma directamente en la entrada del portanúcleo.

Para este sistema se consideró una válvula reguladora manual la razón se debe a las limitaciones del sistema que debe cumplir entre el flujo que regula y la presión, en el mercado las válvulas proporcionales no son una opción

viable porque se enfoca para altos caudales que están fuera del rango de operación.

Se consideró como elemento regulador una válvula de aguja la cual está diseñada para controlar con extremada precisión bajo flujos de gases o líquidos. Su rango de operación es de 0-150 psi y de flujo depende del modelo en este caso se seleccionó el modelo NV-003-HR con capacidad en flujo de aire (referencia) de 10 cc/min – 2000 cc/min. (Bronkhorst USA)

Alternativa c: Controlador de flujo EL-FLOW

Este sistema también se enfoca en controlar el flujo de gas a las referenciadas por el operador pero la diferencia que tiene con las demás alternativas es que el elemento incluye su propio controlador dentro de la componente, la cual al introducir un valor referencial, lo que hace es censar el flujo mediante diferencia de temperatura y con la aplicación de la ley de Kings que describe la transferencia de calor en los flujos donde un cambio de temperatura en un punto tiene relación con la velocidad del flujo, una vez determinado se realiza una comparación

con el valor deseado o referencia y en caso que exista un error considerable un microprocesador envía una señal a una válvula electromagnética para regular el flujo. Se consideró un controlador de flujo EL-FLOW cuyo modelo es F-201CS-2KO, este elemento es compatible con gases. (Dirscherl, 2017)

2.2.3.2 Evaluación de las alternativas para medir el flujo de gas

Para la evaluación de las alternativas se presenta la tabla IX.

Tabla IX. Criterios para alternativas de medición de flujo.

CRITERIO	DESCRIPCIÓN	PONDERACIÓN
Características técnicas	Se refiere a la precisión y repetitividad de los datos en el medidor de flujo, en el caso del rango de presión se considera también para el regulador	9
Disponibilidad en el mercado	Se prioriza que los elementos se puedan conseguir mediante un distribuidor o tienda electrónica en el país, salvo el caso que ningún	9

	componente cumpla con la condición se considera importarlo.	
Costo	Hace referencia a los costos del sistema, transporte y envío en caso que se requiera importarlo	10
Compatibilidad	Se considera tanto la compatibilidad eléctrica (tipo de señal de salida, señal de alimentación) y mecánica (rango de flujo, temperatura)	8

Fuente: Villegas, J., 2017.

Mediante la matriz de decisión (tabla X.) se determinó que la mejor alternativa para establecer el regulador y medidor de flujo es por medio de un regulador de presión o sino por un controlador de flujo, en este caso se puede considerar que las dos soluciones son viables sin embargo por cuestiones del controlador PLC la cual debe manejar todo el proceso se eligió la alternativa A.

Tabla X. Matriz de decisión para medir el flujo de gas.

MATRIZ DE DECISIÓN PARA REGULADOR Y MEDIDOR DE FLUJO									
	CRITERIOS	PONDERACIÓN		ALTERNATIVAS					
				Alternativa A		Alternativa B		Alternativa C	
MEDICIÓN DEL FLUJO DE GAS	Características técnicas	9	%25	MB	36	MB	36	MB	36
	Disponibilidad en el mercado	8	%25	R	16	M	8	M	8
	Costo	10	%27.8	B	30	R	20	R	20
	Compatibilidad	9	%22.2	R	18	B	27	MB	36
	TOTAL	124	%100.0	100		91		100	
	Porcentaje	%100		%80.6		%73.4		%80.6	

	Porcentaje entre las alternativas:	%100	%91	%100
--	------------------------------------	------	-----	------

Fuente: Villegas, J., 2017.

2.2.4 Gases inertes

2.2.4.1 Alternativas de gases inertes

Alternativa a: Aire comprimido

Se obtiene por compresión de aire atmosférico, en compresores especiales.

El aire es una mezcla de gases transparentes sin olor ni sabor. Su composición de mezcla es relativamente constante. El aire no es inflamable ni corrosivo, pero se considera comburente, es decir que puede reaccionar con la mezcla de gases combustibles.

Las propiedades químicas del aire, oxidantes y comburentes, corresponden a las del oxígeno, su componente más activo. (Indura S.A.)

Alternativa b: Helio (He)

A condiciones normales es un gas sin color, olor y sabor. Es aproximadamente 7 veces más liviano que el aire. Es químicamente inerte (cualquier material puede ser usado con Helio), no inflamable y el menos soluble en líquidos

de todos los gases. El único problema es su obtención, su presencia en la atmósfera es muy baja, concentración de 5 ppm. También se obtiene de yacimientos petrolíferos que lo contienen en altas concentraciones.

Se licua a temperaturas sumamente bajas (-268,9°C) y para solidificarse se enfría a -271,4°C a una presión de 30 bar, por lo cual no presenta riesgo su uso en el permeámetro de gas. (Indura S.A.)

Alternativa c: Nitrógeno (N₂)

Es un gas incoloro, inodoro, sin sabor y no tóxico y casi totalmente inerte. Se encuentra en mayor proporción en la atmósfera 78,03%. A una atmósfera y temperatura inferior de -196°C es líquido.

No es inflamable y sin propiedades comburentes, se combina solo con algunos de los metales más activos como litio y magnesio, formando nitruros. A temperaturas muy altas puede combinarse con hidrógeno, oxígeno, y otros elementos. Por su escasa actividad química se utiliza como protección inerte contra contaminación

atmosférica en aplicaciones que no presentan altas temperaturas. (Indura S.A.)

2.2.4.2 Evaluación de las alternativas de gases

Tabla XI. Criterios de alternativas de gases.

Criterio	Descripción	Ponderación
Reacciones Peligrosas	Se describe si el gas reacciona con otro material o existe fugas produciendo algún riesgo con respecto a la integridad física de las personas, si la condición es mínima se obtiene la máxima calificación	8
Incompatibilidades	Si el gas reacciona con otro material produciendo daños en el equipo de medición de permeabilidad, si no presenta algún riesgo obtiene la máxima calificación	6

Costo de obtención e instalación	Describe el costo de la fuente, transporte e instalación, Si tiene un alto costo, recibe la más baja calificación	7
---	---	---

Fuente: Villegas, J., 2017.

Con base a la matriz de decisión (tabla XII.), las mejores alternativas para trabajar con el permeámetro de gas son aire comprimido y nitrógeno, sin embargo, las 3 opciones son considerablemente buenas ya que todas tienen un valor mayor al 70%, la diferencia radica en el costo, a pesar que instalar y comprar un compresor exige un mayor gasto que comprar una bombona de nitrógeno o helio, si se analiza el equipo para un tiempo de vida de 5 años, la compra de bombonas es mayor a la instalación de un compresor considerando que se consume dos bombonas al año, por otro lado no existe una diferencia relativa entre los otros criterios por ejemplo si se analiza el riesgo tanto el nitrógeno como helio no reaccionan pero si desplazan el aire lo que podría dar problemas de respiración al operario por otro lado el aire no afecta a la persona pero si es carburante lo que también conlleva a ser un riesgo.

Finalmente se escogió helio y nitrógeno por disposición del cliente la cual ve menos factible realizar las instalaciones y el respectivo permiso por parte de la universidad.

Tabla XII. Matriz de decisión para gases.

MATRIZ DE DECISIÓN PARA SELECCIONAR LOS GASES									
	CRITERIOS	PONDERACIÓN		ALTERNATIVAS					
				Nitrógeno		Helio		Aire comprimido	
GASES	Reacciones peligrosas	7	38.1%	B	21	B	21	B	21
	Incompatibilidad	7	28.6%	M	28	M	28	B	21
	Costo de obtención e instalación	8	33.3%	B	24	R	16	M	32
	TOTAL	88	100.0%	73		65		74	
	Porcentaje	100%		82.9%		73.9%		84%	

	Porcentaje entre las alternativas:	98.7%	88%	100%
--	------------------------------------	-------	-----	------

Fuente: Villegas, J., 2017.

2.3 Metodología de la Automatización y digitalización del equipo

Para la parte de automatización y digitalización del equipo, el estudiante de Ingeniería en automatización realizó, evaluó y seleccionó la mejor alternativa mediante una matriz de decisión cuyos criterios que consideró fue el costo de instalación, licencia y equipo, el espacio que se requiere y la funcionabilidad que ofrece. Las alternativas propuesta fue un controlador PLC y un sistema de adquisición de datos con la incorporación de un programa de control a través de una computadora, ganando la primera alternativa ya que es dispone de una variedad de comunicación, logra un equipo compacto, además incluye un HMI táctil mejorando la comunicación entre el operador , a pesar que los costos de equipo son mayor para un PLC la diferencia radica que solo se necesita inicialmente un programa (programación del PLC) mientras que labview se debe comprar la licencia anualmente y por último unos de los objetivos propuesto por la estudiante es el uso de un controlador que tenga enfoque a la industria.

Por otro lado, la programación y simulación del PLC va hacer en TIA PORTAL (lenguaje SCL) y el tipo de HMI a implementar es un SIMATIC panel Básico Siemens KTP400 Basic, las principales características tanto del PLC como del HMI se presenta en la tabla XIII y XIV respectivamente.

(Siemens, 2008)



Figura 2.6. Controlador.
Fuente: Siemens, 2008.

Tabla XIII. Características del Controlador.

Tensión de alimentación	24 V DC, 120 V AC, 230 V AC
Rango de alimentación de sensores	20.4 V -28.8 V
Entradas analógicas	0 a 10 V
Interfaz	PROFINET, ETHERNET
Lenguaje de programación	KOP (esquema de contactos),

	FUP(gráfico), SCL (lenguaje siemens)
--	--------------------------------------

Fuente: Siemens, 2008.



Figura 2.7. HMI SIMATIC PANEL.

Fuente: Siemens, 2008.

Tabla XIV. Características del HMI SIMATIC PANEL.

Modo de operación		Táctil + teclas
Tamaño		4.3 in
Elementos de mando		Pantalla y teclas táctiles
Dimensiones frontales		141 mm x 116 mm
Memoria de usuario		10 MB
Interfaces	Serie/PROFIBUS	
	DP/PROFINET(Ethernet)	-/-/-.
	Host USB/dispositivo USB	1/-
	Multimedia /SD	-/-/-/

Conexión al controlador SIMATIC S7	./.
---	-----

Fuente: Siemens, 2008.

2.4 Diseño Final del Permeámetro de gas

Para el proceso de diseño final se tomó en cuenta tanto las consideraciones de requerimiento del diseño del equipo, como de las limitaciones que tiene el sistema. A continuación, se muestra la metodología detallada que se va a realizar en cada sistema, redactando cada etapa a seguir con el fin de tener un mejor panorama del proceso. (Ver figura 2.8).

Para la metodología se utilizó la definida por Norton la cual estableció un diseño conceptual después de una búsqueda de revisión bibliográfica donde se eligió la mejor alternativa mediante una matriz de decisión tomando en cuenta las consideraciones planteadas por el cliente, entre los puntos que se precisaron con detalle para conocer las entradas y salidas de cada sistema.

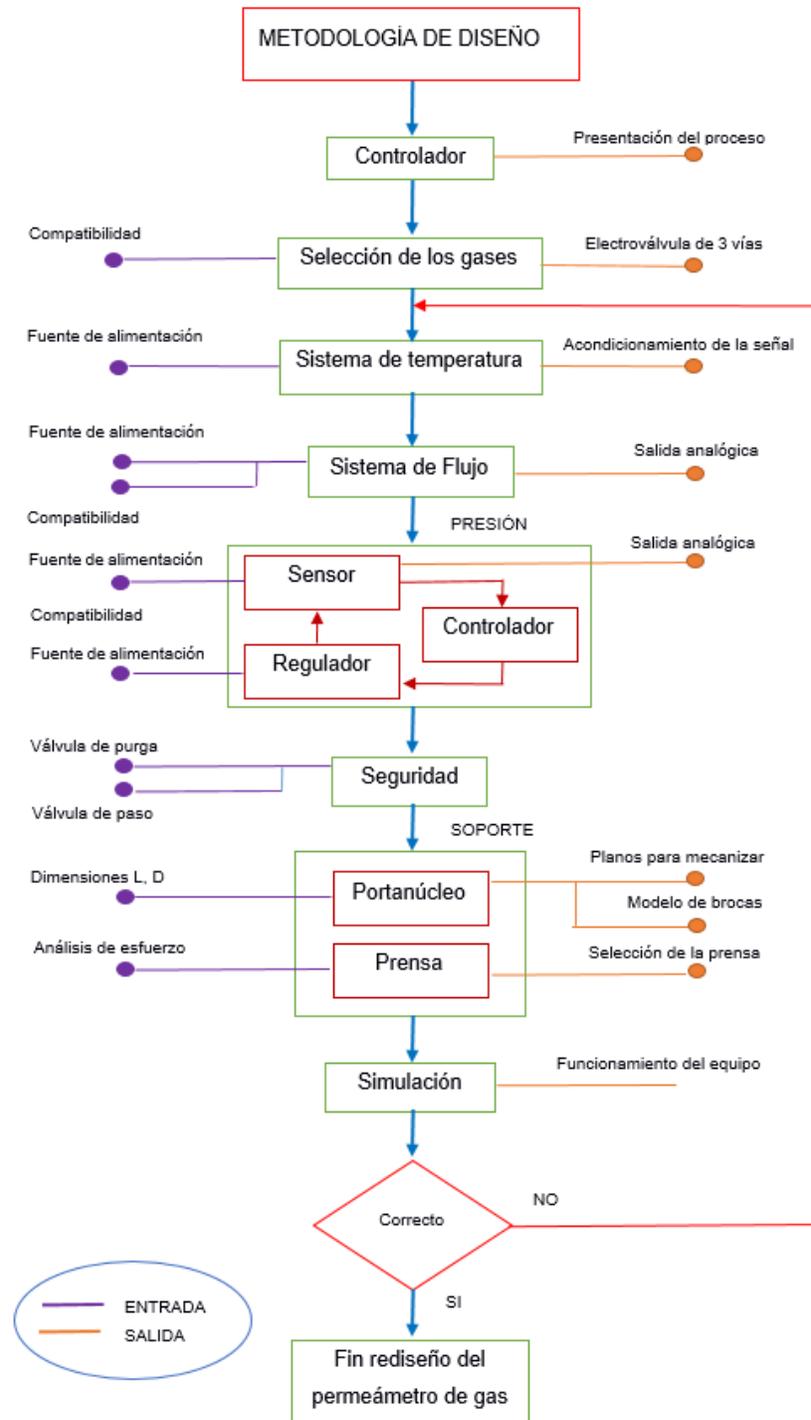


Figura 2.8. Metodología de Diseño.
Fuente: Villegas, J., 2017.

CAPÍTULO 3

RESULTADOS

3.1 Diagrama del Permeámetro de gas

A partir de la metodología descrita en el capítulo anterior procedimos a realizar el diagrama de cómo fue rediseñado el Permeámetro de gas automatizado.

En el diagrama se pudo observar la interacción y obtención de las señales a través de los siguientes elementos:

- FTE: Sensor transmisor de caudal.
- PTE: Sensor transmisor de presión.
- TTE: Sensor transmisor de temperatura.
- N2: Gas Nitrógeno.
- He: Gas Helio.
- PLC: Controlador lógico programable.
- V100: Electroválvula 3/2 vías.
- V101: Electroválvula 2/2 vías.
- V102: Válvula proporcional de presión.

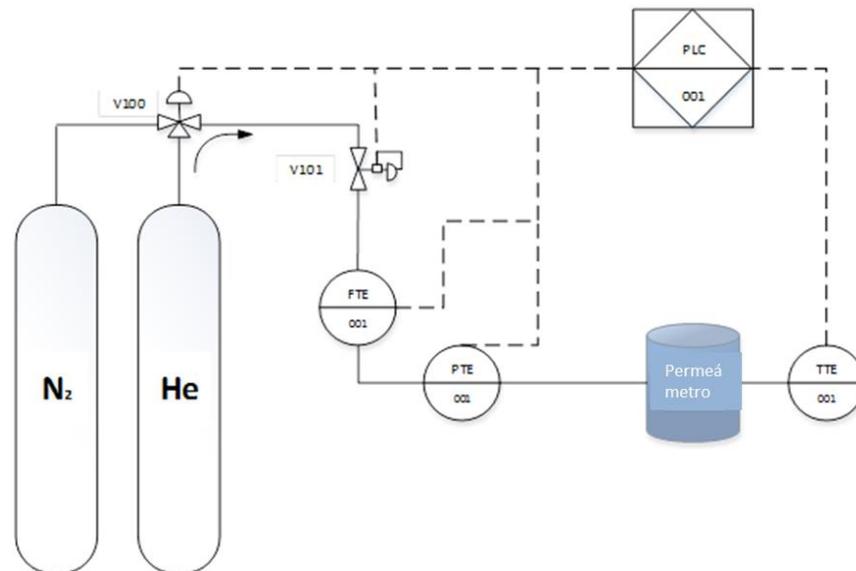


Figura 3.1. Diagrama del Permeámetro de Gas.
Fuente: Guerrero, L., 2017.

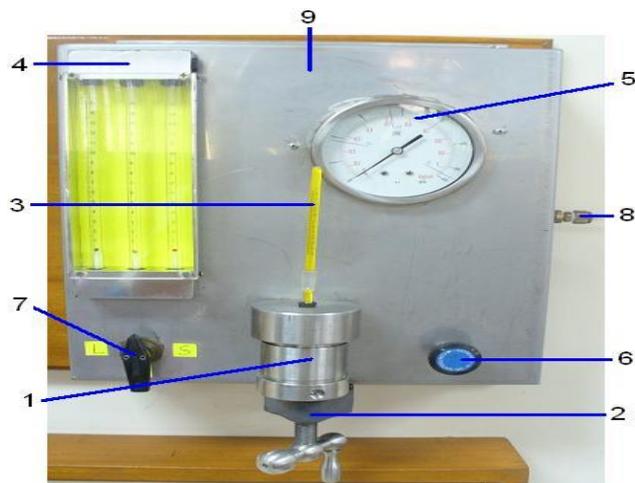


Figura 3.2. Permeámetro de Gas Ruska.
Fuente: Iñiga, F. & Tutiven, J., 2006.

El permeámetro de gas Ruska de utilización manual, fue automatizado en cada uno de sus sistemas de medición. Se cambió el termómetro por un

sensor transmisor de Temperatura, el manómetro se cambió por un sensor transmisor de Presión, el rotámetro se cambió por un sensor transmisor de caudal y las distintas válvulas como la de paso, selectora y reguladora se cambiaron por electroválvulas y válvula proporcional de Presión. Buscando mejorar la obtención de los datos utilizados para la determinación de la permeabilidad absoluta de la roca de muestra.

3.2 Rediseño del Permeámetro de gas

Para cada sistema propuesto en la metodología, presentamos lo rediseñado, según la o las alternativas seleccionadas.

3.2.1 Rediseño Sistema de Temperatura

En el sistema de medición de Temperatura elegimos como alternativa el sensor RTD PT100. Este sensor no se limita por parámetros de presión y caudal sino exclusivamente por su rango de temperatura.

Tabla XV. Datos técnicos de PT100 sensor.

Rango de temperatura	Numero de Hilos	Diámetro de rosca de fijación
-20 a 420 °C	3	¼"

Fuente: Guerrero, L., 2017.

Como resultado se buscó reemplazar la utilización de un termómetro de vidrio, cuya medición de temperatura está determinada por el

ojo humano, así obtener el dato de temperatura necesario para determinar la viscosidad del gas utilizado en la práctica de laboratorio.

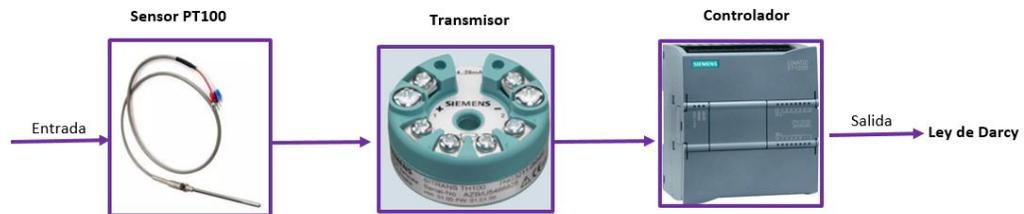


Figura 3.3. Sistema de medición de temperatura.
Fuente: Villegas, J., 2017.

3.2.2 Rediseño Sistema de Presión

En el sistema de medición de Presión elegimos como alternativa el sensor XMLP.

Utilizamos electroválvulas para regular el paso de presión de gas de las bombonas al sistema, a una presión aproximada de 100 Psi manejable para el permeámetro de gas.

Para realizar el control en el paso de los gases se consideró el uso de una electroválvula de 3/2 vías, que admita seleccionar uno de los dos gases al momento de realizar la prueba; cabe recalcar que la válvula de 3/2 vías permitirá el paso del nitrógeno cuando se encuentre en su posición por defecto. Como complemento se

utiliza una electroválvula de 2/2 vías que otorgue el tercer estado para permitir o impedir el paso de cualquiera de los dos gases.

Tabla XVI. Parámetros para electroválvulas.

Válvulas	Tamaño de puerto	Rango de presión	Voltaje de alimentación	Posición por defecto	Tipo de fluido
3/2 y 2/2 vías	1/4"	0-100 Psi	24 Vdc	NC	N ₂ y He

Fuente: Guerrero, L., 2017.

Utilizamos una electroválvula proporcional de presión que recibe una señal de control, ya sea de voltaje o corriente, que le indica la presión deseada y actúa regulando el paso del fluido para alcanzarla.

Tabla XVII. Parámetros para válvula proporcional de presión.

Tamaño de puerto	Rango de presión	Voltaje de alimentación	Señal de control	Tipo de fluido
1/4"	0-100 Psi	24 Vdc	0-10 V 0-20 mA	N ₂ y He

Fuente: Guerrero, L., 2017.

Utilizamos un sensor de presión que fue colocado junto con el porta núcleo, permitiendo asegurar que la presión regulada por el PLC del fluido es siempre la misma.

Tabla XVIII. Datos técnicos del sensor de presión.

Tamaño de puerto	Rango de presión	Voltaje alimentación	Señal de Salida	Tipo de fluido
1/4"	0-10 bar	24 Vdc	0-10 V	Gas, Aire

Fuente: Guerrero, L., 2017.

Como resultado se buscó cambiar del permeámetro todas las válvulas de paso, reguladora y de selección de presión de funcionamiento manual por automatizado controlado por el PLC evitando problemas de fuga de gas y pérdida de presión que afecten a la determinación de las variables necesarias para los cálculos de permeabilidad. También se buscó cambiar el uso del manómetro de lectura de presión por el ojo humano por un sensor de presión que registra la señal en el PLC dándonos datos más precisos de las presiones.

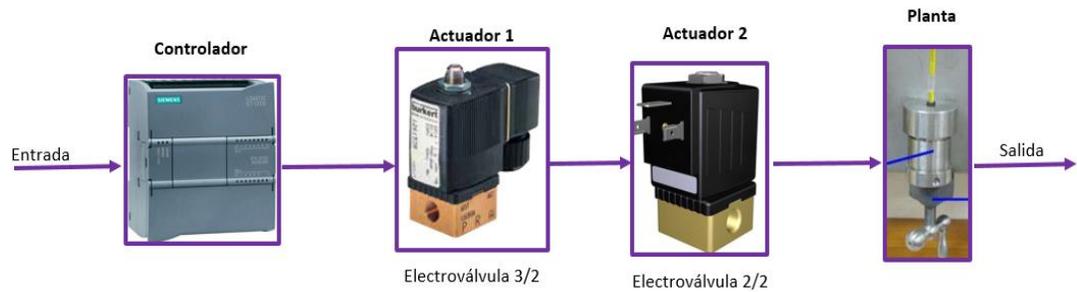


Figura 3.4. Sistema para paso de gas.
Fuente: Villegas, J., 2017.

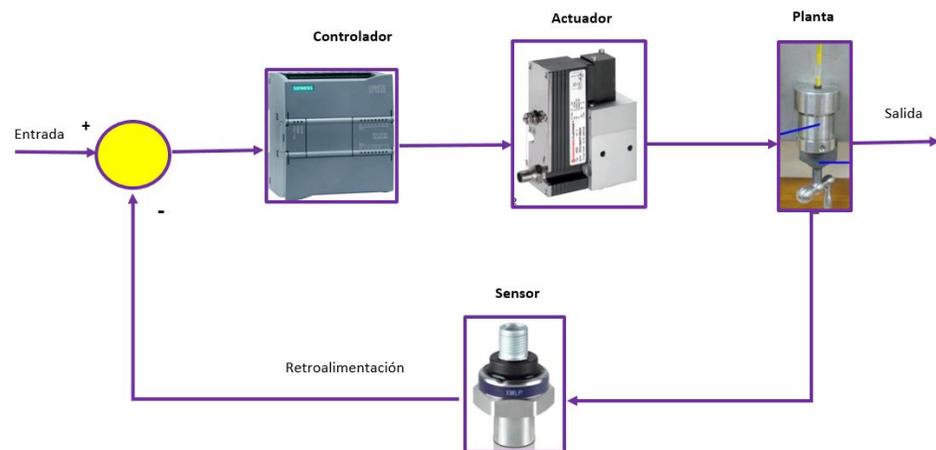


Figura 3.5 Sistema de medición de presión.
Fuente: Villegas, J., 2017.

3.2.3 Rediseño Sistema de Flujo

En el sistema de medición de flujo elegimos como alternativa el regulador de presión proporcional NORGREN y medidor de flujo EI-FLOW.

Utilizamos un sensor de flujo para determinar la cantidad de fluido con la cual se trabaja en la práctica de laboratorio, este sensor tiene los siguientes parámetros.

Tabla XIX. Datos del sensor de flujo.

Flujo	Rango de presión	Voltaje alimentación	Señal de Salida	Tipo de fluido
3 l/min	0-500 KPa	12- 24 Vdc	0-5 V	N ₂ y He

Fuente: Guerrero, L., 2017.

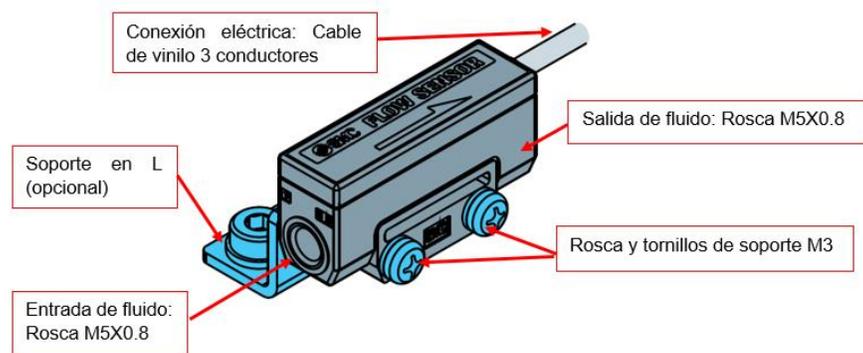
La señal de salida del sensor es en voltaje por lo que en el PLC se transforma a unidades de caudal, se realizaron los cambios de escala de la variable para presentar los datos en unidades de cc/s necesarios para el cálculo de permeabilidad.

Como resultado se buscó mejorar la utilización de un sistema de medición de caudal como el rotámetro que la lectura de datos es por apreciación del ojo humano por un sistema automatizado dándonos lecturas más exactas del flujo volumétrico del gas para proceder al cálculo de la permeabilidad de la roca muestra.

Tabla XX. Escalamiento de datos.

Señal de salida		Caudal	
[V]		l/min	cc/s
1	0,2	0	0
1,5	0,3	0,08	1,3333
2	0,4	0,17	2,83333
2,5	0,5	0,31	5,166667
3	0,6	0,55	9,166667
3,5	0,7	0,9	15
4	0,8	1,39	23,166667
4,5	0,9	2,05	34,166667
5	1	3	50

Fuente: Guerrero, L., 2017.

**Figura 3.6.** Sensor de flujo seleccionado.

Fuente: Villegas, J., 2017.

3.2.4 Rediseño del Portanúcleo

Del rediseño del portanúcleo se encargó el estudiante de la carrera de ingeniería en mecánica, cumpliendo los pedidos o necesidades del cliente en dimensiones de longitud y diámetro del tapón muestra. Se consideró las características presentes en la norma API RP40 sección 6.

Tabla XXI. Tamaño de muestras.

Tamaño	Dimensiones
Núcleo 1 (muestra actual)	L: 1.65 in (42mm); D: 1.5 in
Núcleo 2	L: 1.65 in (42mm); D: 1 in
Núcleo 3	L: 2 in (50.8 mm); D: 1.5 in

Fuente: Villegas, J., 2017.

En la figura 3.7 describimos el portanúcleo para muestras de tamaño estándar. Este descansa sobre un tronillo de banco para proporcionar los esfuerzos axiales de confinamiento por medio de una manivela que desplaza verticalmente un tornillo de potencia.

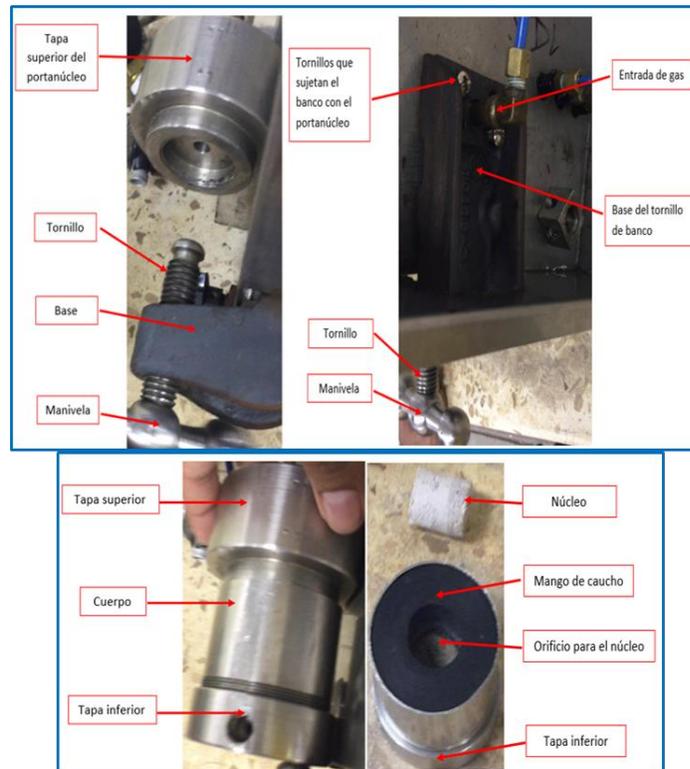


Figura 3.7. Portanúcleo.
Fuente: Villegas, J., 2017.

3.2.5 Accesorios y tubería

Se seleccionó la tubería considerando la condición de flujo estable (ley de Darcy) relacionada con velocidades bajas y por lo tanto con flujo laminar, ya que es la única manera para que el fluido al pasar por los poros de la roca no afecte de manera significativa el efecto de la resistencia lineal. A continuación se presentan las dimensiones de tubería que se seleccionó.

Tabla XXII. Dimensiones de tubería.

Tramo	Diámetro externo	Longitud
Bombona de Helio – Electroválvula 3/2	8 mm	X ≥ 517 mm
Bombona de Nitrógeno – Electroválvula 3/2		X ≥ 517 mm
Electroválvula 3/2 – Electroválvula 2/2		115 mm
Electroválvula 2/2 – Regulador de presión		221 mm
Regulador de presión – reductor		110 mm
Reductor - sensor de flujo	6mm	130 mm
Sensor de flujo – sensor de presión		45 mm
Sensor de presión – Portanúcleo		180 mm

Fuente: Villegas, J., 2017.

Para el rediseño fue necesario incluir válvulas de paso como elementos de protección del sistema, en caso de emergencia con las válvulas cerrar el paso del gas hacia el equipo.

También se propuso implementar válvulas de alivio colocadas en la entrada de la electroválvula 3/2 y en la entrada del sensor de flujo.

Se propuso utilizar racores para conectar los componentes con las tuberías, estos están hechos de plástico o de metal, la cantidad y tipo de racor depende del componente y su tipo de rosca

Tabla XXIII. Elección de racores.

Componente	Rosca	Cantidad, tipo
Electroválvula 3/2	G 1/4	3, exterior
Electroválvula 2/2	1/4 NTP	2, exterior
Válvula reguladora	G 1/4	2, exterior
Sensor de presión	1/4 NTP	1, exterior
Sensor de flujo	M5	2, exterior
Transmisor de temperatura	-----	-----
Portanúcleo	1/4 NTP	1, exterior
Válvula de paso 1 y 2	1/4 NTP	4, exterior
Válvula de purga 1 y 2	1/4 NTP	4, exterior

Fuente: Villegas, J., 2017.

Tabla XXIV. Tipos de racores.

Descripción	Conexión D1	Conexión D2	Cantidad
Racor recto QS	Rosca exterior G1/4	Para tubo de diámetro exterior 8mm	4
Racor recto PC	Rosca exterior 1/4 NTP	Para tubo de diámetro 8 mm	5
Racor recto QSM	Rosca exterior M5	Tubo de diámetro 6mm	2
Racor en T PC	1 terminal con Rosca exterior 1/4 NTP	2 terminales para tubo de 8 mm	1
Racor en T PC	1 terminal con Rosca exterior 1/4 NTP	2 terminales para tubo de 6 mm	2
Racor reductor	Tubería de 8 mm	Tubería de 6 mm	1
Racor en L QSL	Rosca exterior G1/4	Tubo diámetro 8mm	2
Racor en L PC	Rosca exterior 1/4 NTP	Tubo diámetro 8mm	1

Racor QS junta serie estándar	Terminal para tubería de 8 mm y 6 mm	4
Acople con rosca hembra – hembra	1/4 NTP	3

Fuente: Villegas, J., 2017.

3.3 Modelo final del permeámetro de gas automatizado

Se tuvo en cuenta todas las indicaciones presentes en la metodología, requisitos para el rediseño, los distintos rediseños de los sistemas de medición del equipo, tanto en la parte mecánica como en la automatización.

Con la ayuda de un software se consiguió modelar la forma que tendrá el permeámetro de gas, mostrando como resultado la siguiente figura ilustrativa.

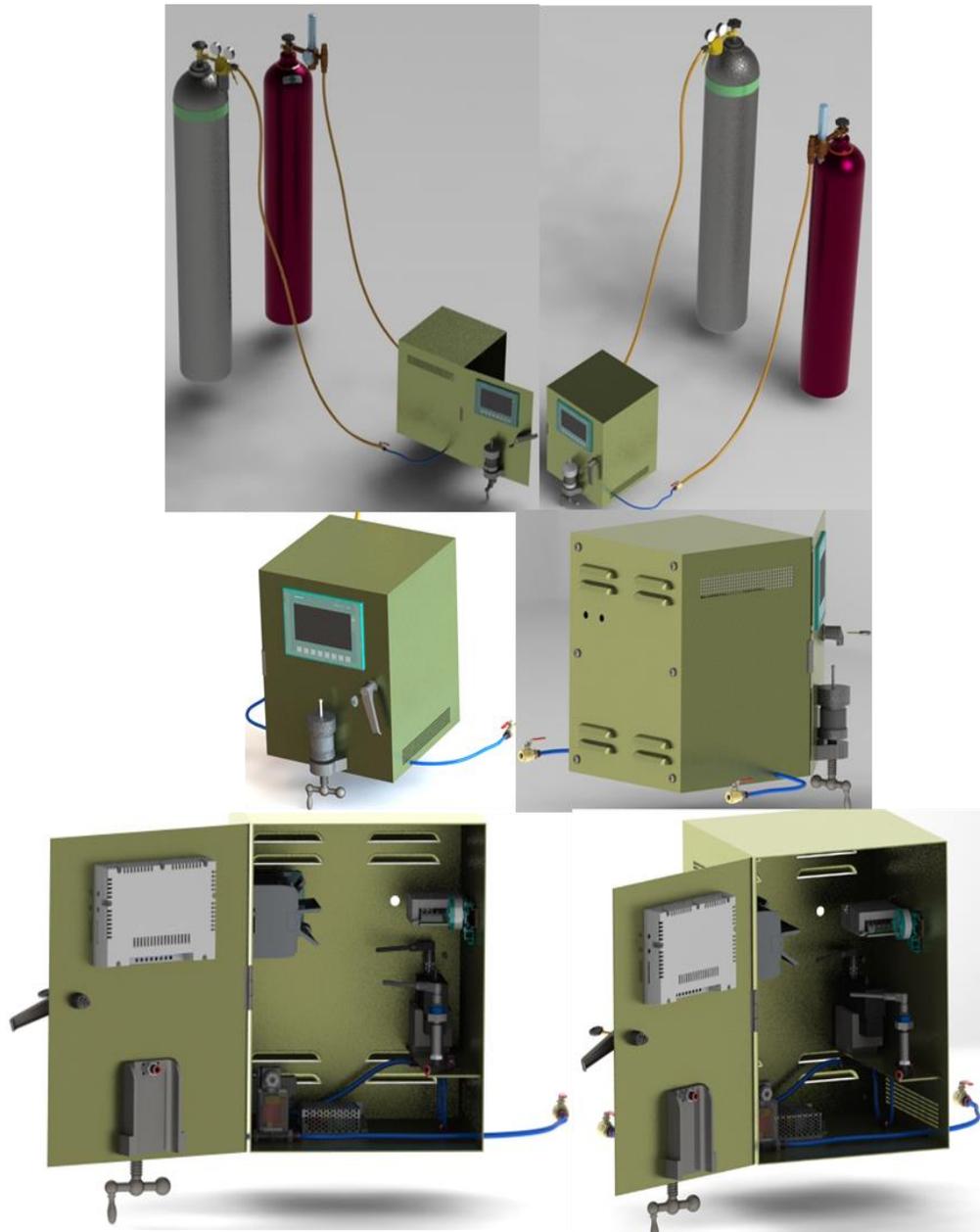


Figura 3.8. Modelo del permeámetro de gas automatizado.
Fuente: Villegas, J., 2017.

3.4 Cálculos de permeabilidad y resultados

Se presenta el siguiente ejercicio para demostrar el procedimiento matemático utilizado en el cálculo de la permeabilidad absoluta de una muestra analizada en el laboratorio en el permeámetro de gas.

Los datos presentados a continuación fueron obtenidos durante un flujo de nitrógeno en un núcleo de muestra de 3,81 cm de diámetro y 10,0 cm de longitud. Determinar la permeabilidad absoluta corregida con el efecto Klinkenberg del núcleo de muestra. Viscosidad del nitrógeno 0.025 cp a condiciones de prueba, y presión de salida P_2 se mantiene a una atmósfera

Numero de corrida	q_g (cm ³ /s)	Presión P_1 (atm)
1	4,05	1,13
2	17,94	1,50
3	34,78	1,86
4	61,79	2,33

(Dandekar, 2013).

Como primer paso se procedió a encontrar el área transversal de la

$$\text{muestra } A = \pi \frac{d^2}{4} \text{ Ec.1.16 } A = \pi \frac{3,81^2}{4} = 11,40 \text{ cm}^2$$

Luego se procedió a calcular la permeabilidad para cada corrida utilizando

la Ec.1.27 $k = \frac{2q\mu L P_2}{A(P_1^2 - P_2^2)}$ y la Presión promedio para cada corrida $P_m =$

$$\frac{(P_1 + P_2)}{2} \text{ Ec.1.22}$$

Tabla XXV. Permeabilidad y Presión promedio.

Numero de corrida	k_g (darcy)	P_m (atm)	$1/P_m$ (atm ⁻¹)
1	0,64	1,065	0,9
2	0,63	1,25	0,8
3	0,62	1,43	0,7
4	0,61	1,665	0,6

Fuente: Navarrete, D., 2017.

Se graficó k_g vs $1/P_m$ y se buscó donde la recta corte con el eje de las y, dando como resultado la permeabilidad absoluta corregida por el efecto Klinkenberg.

$$k_{gas} = k_{liquido} + m \left[\frac{1}{P_m} \right] \text{ Ec.1.21 } m = \frac{0,63 - 0,64}{0,8 - 0,9} = 0,1$$

Conociendo la pendiente y un punto, se calculó la permeabilidad corregida

$$K_{liquido} = k_{gas} + m \left[\frac{1}{P_m} \right] = 0,64 + 0,1(0,9) = 0,55$$

La permeabilidad absoluta corregida por el efecto Klinkenberg: 0,55 darcys

Como resultado en el permeámetro de gas automatizado, el PLC nos permite realizar los cálculos de manera rápida, debido a la programación ingresada para determinar la permeabilidad absoluta corregida y evitar que los estudiantes hagan cálculos y gráficos tediosos.

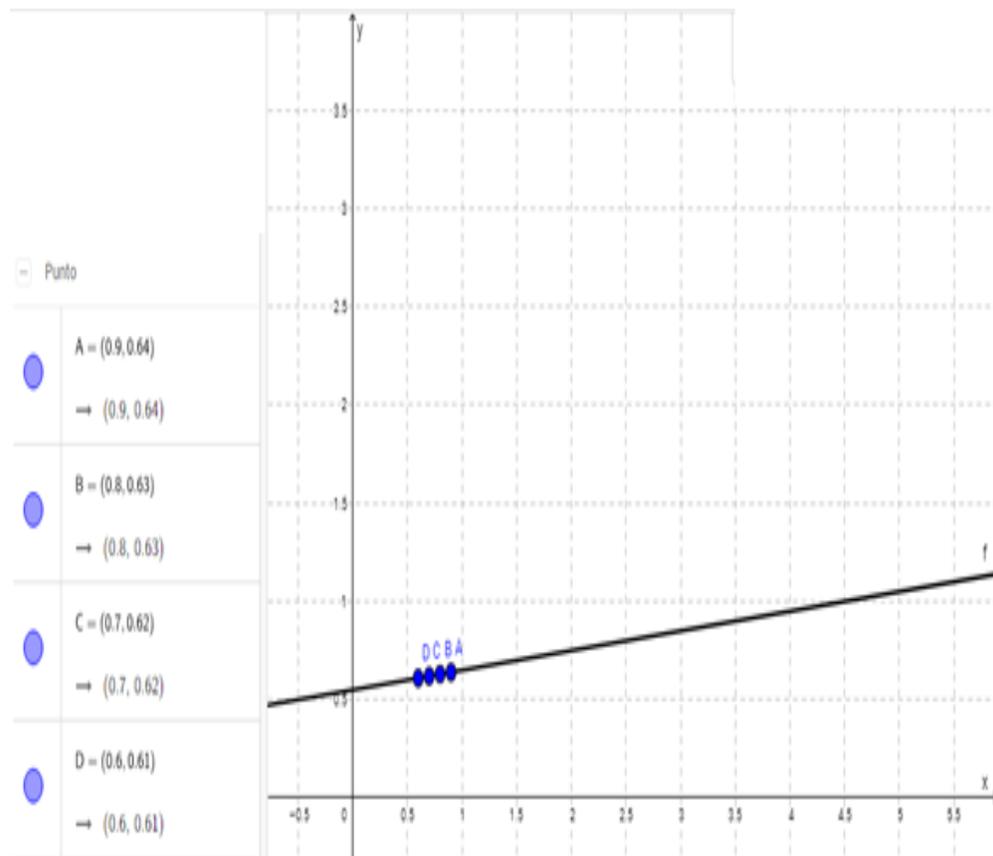


Figura 3.9. Gráfica Permeabilidad vs La inversa de presión promedio.
Fuente: Navarrete, D., 2017.

3.5 Análisis de costos

Los costos detallados a continuación son cotizaciones dadas por varias empresas nacionales para un determinado tiempo la cual están sujeto a cambio, los precios ya incluyen IVA y descuento, no existe elemento que se requiera importar desde el extranjero por parte de los autores cumpliendo con uno de los requerimientos del cliente, por último, la estructura o caja ya incluye el costo de la mano de obra.

Tabla XXVI. Análisis de costos.

SISTEMA PARA EL PASO DE FLUJO				
Ítem	Cantidad	Descripción	Precio Unitario	Total
1	1	Electroválvula 3/2 burkert	\$105.10	\$105.94
2	1	Electroválvula 2/2 burkert	\$103.58	\$104.41
3	2	Sócalo (conector 2508)	\$4.79	\$9.66
SUBTOTAL 1			\$220.01	
SISTEMA DE PRESIÓN				
Ítem	Cantidad	Descripción	Precio Unitario	Total

4	1	Válvula reguladora Norgren VP23	\$500.00	\$500.00
5	1	Sensor de presión XMLP	\$120.00	\$120.00
SUBTOTAL 2			\$620.00	
SISTEMA DE FLUJO				
Ítem	Cantidad	Descripción	Precio Unitario	Total
6	1	Sensor de flujo SMC (0- 3 lit/min)	\$300.00	\$336.00
SUBTOTAL 3			\$336.00	
SISTEMA DE TEMPERATURA				
Ítem	Cantidad	Descripción	Precio Unitario	Total
7	1	PT 100	\$81.95	\$91.78
8	1	Transmisor de Temperatura para PT 100	\$169.00	\$151.42
9	1	Base para transmisor en carril DIN	\$127.00	\$113.79

SUBTOTAL 4			\$356.99	
SISTEMA DE CONTROL				
Ítem	Cantidad	Descripción	Precio Unitario	Total
10	1	PLC Siemens S7-1200 CPU 1212C	\$497.00	\$389.65
11	1	Módulo de señal SM1234	\$623.00	\$488.43
12	1	HMI SIMTIC Confort KTP 700	\$1,400.00	\$1,254.40
13	1	Fuente conmutada para PLC	\$50.00	\$56.00
SUBTOTAL 5			\$2,188.48	
REGULADORES PRINCIPALES Y ESTRUCTURA				
Ítem	Cantidad	Descripción	Precio Unitario	Total
14	2	Regulador de presión 1 etapa	\$466.50	\$933.00
15	1	Estructura 350x350x450mm	\$60.00	\$60.00

SUBTOTAL 6			\$993.00	
ACCESORIO Y TUBERÍA				
Ítem	Cantidad	Descripción	Precio Unitario	Total
16	2	Válvula de esfera GENEBRA	\$3.58	\$8.02
17	4	Racor recto G ¼ para tubería de 8mm	\$2.63	\$10.60
18	10	Racor PC ¼ NTP para tubería de 8mm	\$3.16	\$35.39
19	2	Racor PC ¼ NTP para tubería de 6mm	\$3.16	\$7.08
20	2	Racor recto M5 para tubería de 6mm	\$4.63	\$10.37
21	2	Racor en T ¼ NTP para tubería de 6mm	\$6.60	\$14.78
22	2	Racor reducto 8 a 6mm	\$5.53	\$12.39
23	3	Racor en L G ¼ para tubería de 8mm	\$4.10	\$13.78
24	1	Racor junta para tubería	\$3.65	\$4.09

		de 8mm		
25	1	Acople hembra-hembra ¼ NTP	\$13.73	\$15.38
26	3	Tubería PAN de 8mm	\$2.17	\$6.56
27	2	Tubería PAN de 6mm	\$1.47	\$2.96
SUBTOTAL 7			\$141.40	

Fuente: Villegas, J., 2017.

Tabla XXVII. Total.

Subtotal 1	\$220.01
Subtotal 2	\$620.00
Subtotal 3	\$336.00
Subtotal 4	\$356.99
Subtotal 5	\$2,188.48
Subtotal 6	\$993.00
Subtotal 7	\$141.40
Total	\$4,855.88

Fuente: Navarrete, D., 2017.

CAPÍTULO 4

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

CONCLUSIONES

Las propiedades físicas del medio poroso como la permeabilidad, son la base para el estudio de la ingeniería en petróleo, en todas sus divisiones, ramificaciones y campos de estudio, desde cálculos para determinar el volumen de hidrocarburo en el yacimiento, perfilaje, pruebas pozos, estimulación y reacondicionamiento de pozos, proyectos de producción y recuperación mejorada de pozos, etc.

El proyecto integrador multidisciplinario invita a los estudiantes a desarrollar capacidades de trabajo en equipo y la necesidad de aprender nuevos conocimientos proporcionados por los estudiantes de otras carreras.

Es de suma importancia asignar proyectos de rediseño, automatización o cualquier tipo de innovación en los equipos del laboratorio de petrofísica de la FICT para que los estudiantes comprueben y confirmen los conocimientos teóricos de las materias de la carrera de ingeniería en petróleos vistas en clases.

El permeámetro es un equipo especializado para medir la permeabilidad absoluta de las rocas, es decir cuando un fluido satura 100% el espacio poroso

de la roca, y su fundamento es la ley de Darcy, el flujo tiene que ser estable y laminar.

Al utilizar como fluido gas en las prácticas de permeabilidad, se debe tomar en cuenta que el flujo se encuentre en estado estable (velocidades bajas), y modificar la ley de Darcy ya que está se aplica para fluidos como el agua, teniendo en cuenta el efecto de desplazamiento del gas en los poros de la roca y aplicando la fórmula de corrección para el efecto Klinkenberg.

Conociendo estos principios de funcionamiento del permeámetro y las características presentes en la norma API RP40 sección 6, se consiguió modelar o rediseñar el permeámetro y su posible automatización y digitalización de los datos de la prueba de laboratorio.

RECOMENDACIONES

Antes de realizar una práctica con el permeámetro de gas, la muestra haya pasado por un proceso de limpieza y secado, para evitar contaminación y falsos resultados.

Antes de realizar la prueba, se calcule y apunte las dimensiones de la muestra como su longitud y área transversal, datos necesarios para los cálculos de la permeabilidad.

Utilizar para la prueba gases que sean inertes y no tóxicos, para evitar problemas de salud y reacciones químicas peligrosas con los componentes del equipo.

Realizar mantenimiento periódico al equipo para evitar corrosión y fallos en la operación de los componentes, detectar si hay fallos en los componentes para su debido remplazo y así evitar malos o falsos resultados en las variables de estudio.

Para realizar el proyecto fue necesario reunir la mayor cantidad de información existente de permeámetros de gas automatizados en el mercado, para así

conocer cómo se podría rediseñar el permeámetro del laboratorio de petrofísica de la FICT que está en malas condiciones, fuera de servicio y es de uso manual. Para futuros proyectos o innovación de equipos de permeabilidad revisar las características y toda la información presente en la norma API RP40 sección 6.

ANEXOS

ANEXO A

GUÍA DE SELECCIÓN PARA PERMEÁMETROS QUE USAN GAS.

Reference Section Numbers	Type of Measurement	Approx. Perm. Range, md	Apparatus or Application	Major Advantages	Major Limitations
6.3.1.1 6.3.1.1.1.1	Axial flow, steady state in core plugs	0.1-10,000	Low pressure apparatus with manometers, orifice flow meters	Low capital cost; simple manual system; workhorse for decades; large data base for comparison	Labor intensive; high operating cost; low-stress perms; no slip correction; must check for inertial resistance
6.3.1.1 6.3.1.1.1.2	Axial flow, steady state in core plugs	0.1-10,000	Apparatus with electronic sensors, high pressure, core holder	Can be automated; reservoir stresses can be approximated; better precision and accuracy than with manual system	Must make multiple measurements for gas slippage correction; must check to ensure negligible inertial resistance
6.4.1.1 B.6.8.2	Axial flow, pressure falloff in core plugs	0.001-30,000	Wide range; med. to high stress measurements with corrections for b and β	Well adapted for automation; no flow meters required; can yield reservoir-condition perms (k_v), and k_g	Higher capital cost for automated system with high accuracy pressure transducers and data acquisition system
6.4.1.3 D.6.8.4	Axial flow, pulse-decay in core plugs	.00001-0.1	High stress apparatus for very low perms.	Only method for ultra-low perms; well adapted for automation; porosity can be determined in same apparatus	Requires high pressure, leak-tight system with high quality transducers and data acquisition system—higher capital cost
6.3.1.2	Probe perm., s.s., on whole core	1-10,000	Zero stress, high density, localized measurements for heterogeneous cores	No plug preparation required (core slabbing recommended); relatively fast; can be automated or made portable	Zero stress, non slip corrected perms are high at low end of range; prone to high inertial resistance at high end
6.4.1.2 C.6.8.3	Probe perm., pressure falloff on whole core	0.001-30,000	Zero stress, high density, localized measurements for heterogeneous cores	No plug preparation required (core slabbing recommended); very fast; automated; corrected for b , β	Zero stress perms are high, especially at low end of range; higher capital cost for automated system
6.3.1.3	Transverse, s.s. perm. in whole core	0.02-500	Directional perm. in whole core (or plug) for k_{max} and k_{90°	Can measure "horizontal" perm. in various directions; averaging obtained using whole-core sample.	Cleaning and preparation of whole core sample more expensive; only k_g obtained without multiple measurements

ANEXO B
CONSTANTES Y SUS UNIDADES.

Variable or Constant	Units or Values of Constants			
	SI	Preferred SPE	Traditional	Common Usage
A , area perpendicular to flow	m ²	m ²	cm ²	cm ²
b , Klinkenberg slip factor	Pa	Pa	atm	psi
D , diameter of sample	m	m	cm	cm
g , gravitational acceleration	m/s ²	m/s ²	cm/s ²	cm/s ²
k , permeability	m ²		darcy	millidarcy
L , length of sample	m	m	cm	cm
M , gas molecular weight	kg/kg-mole	kg/kg-mole	g/g-mole	g/g-mole
P , absolute pressure	Pa	Pa	atm	psia
p , gauge pressure	Pa	Pa	atm	psig
Δp , differential pressure	Pa	Pa	atm	psi
q , volumetric flow rate				
r , radius of sample or seal	m	m	cm	cm
S , compressive storage				
s , flow-direction distance	m	m	cm	cm
T , absolute temperature	K	K	K	K
V_p , pore volume				
V_r , total reservoir volume				
v_s , volumetric flux	m/s	m/s	cm/s	cm/s
β , inertial resistivity	m ⁻¹	m ⁻¹	cm ⁻¹	ft. ⁻¹
ρ , gas or liquid density	kg/m ³	kg/m ³	g/cm ³	g/cm ³
μ , gas or liquid viscosity	Pa-s	Pa-s	cp	cp
R , gas-law constant	8314	8314	82.05	1205.8
C_1 , in Darcy or Forch. eq.	1.0	1.0	1.0	6.8046E-2
C_2 , in Darcy or Forch. eq.	1.0	1.0E+12	1.0	1000.
C_3 , constant in Forch. eq.	1.0	1.0	9.8692E-7	3.2379E-8
C_4 , constant in eqs. with g	1.0	1.0	1.0133E+6	68 950.

BIBLIOGRAFÍA

Andersen, M., Duncan, B., & McLin, R. (2013). Los núcleos en la evaluación de formaciones. *Oilfield Review*, 25(2), 21. Recuperado de http://www.slb.com/~media/Files/resources/oilfield_review/ors13/sum13/02_core_truth.pdf.

Al-Qarni, A., Ault, B., Heckman, R., McClure, S., Denoo, S., Rowe, W., Fairhurst, D., Kaiser, B., Logan, D., McNally, A., Norville, M., Seim, M., & Ramsey, L. (2001). De las propiedades de los yacimientos a las soluciones de estimulación. *Oilfield Review*, 48-49. Recuperado de https://www.slb.com/~media/Files/resources/oilfield_review/spanish01/spr01/p4_2_60.pdf.

API-RP40. (1998). Recommended practice for core analysis.

Beggs, H. D. (1991). Production optimization.

Bronkhorst USA Inc. Recuperado de <https://www.bronkhorstusa.com>.

Craft, B.C., & Hawkins, M. (1991). Applied petroleum reservoir engineering.

Creus, A. (2011). Instrumentación Industrial.

Dandekar, A. (2013). Petroleum reservoir rock and fluid properties.

Escobar, F. (2004). Fundamentos de ingeniería de Yacimientos.

Iñiga, F., & Tutiven, J. (2006). Diseño de un Permeámetro de gas y operación y calibración de la Celda Triaxial. ESPOL.

Lache, A. (2008). Ensayo de la permeabilidad de rocas: Automatización de la prueba.

Rodríguez, J. R. (2007). Ingeniería básica de yacimientos.