

# CAPITULO 3

## 3. DISEÑO DEL EQUIPO

Para el diseño del permeámetro de gas se tuvo que realizar un análisis detallado de equipos antes diseñados y se realizó una visita al Laboratorio de Petróleo de Petroproducción. Para lograr adquirir las distintas partes que lo conforman se recurrió a laboratorios mecánicos y a empresas internacionales.

### 3.1. Principio de funcionamiento

El núcleo del yacimiento es hermetizado en la celda porta núcleo para que el gas que ingresa a la celda atraviese completa y exclusivamente la muestra, para finalmente salir a la atmósfera. El termómetro indica la temperatura de entrada. La presión de entrada, ajustada con el regulador, se puede leer en el manómetro. La tasa de flujo del gas es determinada por la altura del centro del flotador en uno de los tres flujómetros.

El tubo medidor de caudal deseado se selecciona mediante una válvula de tres vías. La válvula de alivio permite que pequeñas cantidades de gas sean descargadas a la atmósfera.

Se recomienda utilizar cualquier tipo de gas comprimido como un medio de medición, siempre y cuando este gas sea inerte y no tóxico como el nitrógeno ( $N_2$ ). Un regulador auxiliar debe usarse para reducir la presión del gas comprimido hasta que se establezca ligeramente por encima de la presión de operación del equipo (20 - 50 psig.). Si se usa un compresor de aire, este aire debe estar seco y filtrado. Además, se debe tener cuidado que las pulsaciones del compresor no entren al permeámetro. La viscosidad puede ser determinada de cartas de  $\mu$  (cp) vs. T ( $^{\circ}C$ ).

La prueba actual de una muestra requiere de un tiempo relativamente pequeño. El manómetro es ajustado a la presión de referencia con la válvula de control de presión (regulador). La válvula de tres vías conecta el correcto tubo medidor de caudal (flujómetro) al sistema, y se obtiene una lectura para el núcleo de la prueba. Después de que la presión en el manómetro haya sido comprobada y si es necesario reajustada, se registra la lectura del flujómetro y la temperatura.

La permeabilidad es calculada de las dimensiones del core y a los valores ajustados y observados, usando una formula deducida de la ley de Darcy con la ecuación de los gases reales (para mayores detalles revise la sección 1.1.2). Quedando la ley para flujo lineal de gases la misma que para líquidos, siempre y cuando que la tasa de flujo de gas, se exprese a condiciones de presión media y temperatura de flujo, la ecuación es la siguiente:

$$k = \frac{\bar{q}\mu l}{A(P_1 - P_2)} \quad 3.1$$

donde:

k: permeabilidad

$\bar{q}$ : tasa de flujo promedia

$\mu$ : viscosidad

l: longitud del core

A: área de sección transversal del core

$P_1$ : presión de entrada

$P_2$ : presión de salida

### **3.2. Celda porta núcleos**

La celda porta núcleo esta equipada en su parte interna con un caucho el cual es utilizado para hacer la función de la capa impermeable en los yacimientos de hidrocarburos, esta capa impermeable impide la migración del gas, petróleo y/o agua; y junto con el núcleo, simularíamos un reservorio de hidrocarburos a escala.

Para las pruebas de permeabilidad, las muestras de roca (plugs) generalmente están diseñadas en cortes cúbicos o cilíndricos de fracciones de los núcleos del campo los cuales pueden ser extraídos por varios métodos, a continuación se citan algunos:

#### **Extracción de Núcleos**

Para que sea efectiva, la extracción de núcleos debe ser planeada teniendo en cuenta la evaluación de la formación. Con núcleos de calidad, las compañías petroleras pueden comprender mejor las características de la formación, incluyendo litología, porosidad, PERMEABILIDAD y humectabilidad.



**FIGURA 3.1. BROCAS PARA EXTRAER NÚCLEOS (BAKER HUGHES)**

### **Sistemas toma muestras**

#### **Gel Coring**

Proporciona muestras de calidad para análisis de reservorios

Preserva la sequedad de la muestra

Protege la integridad física de la muestra

Elimina la invasión estática de la muestra

El gel protege a la muestra de alteraciones de su contenido de fluido y daños a la formación, minimizando el contacto del material con el fluido de perforación y los filtrados. Encapsula totalmente la muestra en el orificio con un gel y lo resguarda hasta que pueda ser sacado del pozo y transportado al laboratorio para su análisis.

### **Sistema CoreDrill**

La extracción de muestras durante la perforación produce altos rendimientos operativos, rápidos cambios de herramientas, sin necesidad de viajes de tubería para obtener las muestras, con mínima interrupción del proceso de perforación.



**FIGURA 3.2. COREDRILL**

### **IDGS, Sistema de Obtención de Datos in Situ**

Obtiene muestras de mayor calidad, libres de fracturas mecánicas o por sobrepresión, invasión de fluidos o pérdidas de líquido del yacimiento. Los fluidos del reservorio se colectan bajo presión dentro de la muestra de roca.

Los núcleos cilíndricos permiten determinar la permeabilidad en una dirección. Mientras que los núcleos cúbicos permiten determinar la permeabilidad en tres direcciones.

Luego se remueve todas las trazas de petróleo de la muestra y se lo deja completamente seco. Los solventes comúnmente usados para esta extracción son el tricloro-etileno, tolueno, éter, o pentano. No es recomendable usar cores que necesiten de un excesivo calentamiento.

En el caso de cores delicados o frágiles, los cuáles al darles forma mediante lijada podrían dañarse o aplastarse cuando se introducen en la celda porta núcleo, entonces para evitar esto primero se sumergen en cera y luego son introducidos en camisas metálicas, para posteriormente introducirlos en el porta núcleo.

### **3.3. Sistema de medición de presión**

Este permeámetro está calibrado para funcionar a una presión manométrica de entrada de 1 atm para el tubo small, 0.5 atm para el tubo medium y 0.25 atm para el tubo large.

Desde que la presión de salida es de 1 atm absoluta, el gradiente de presión es igual al indicado por el manómetro. Así, las fórmulas nos dan:

$$\text{Flujómetro Large (0.25 atm):} \quad k = 4 \frac{\mu \bar{q} l}{A} \quad 3.2$$

$$\text{Flujómetro Medium (0.5 atm):} \quad k = 2 \frac{\mu \bar{q} l}{A} \quad 3.3$$

$$\text{Flujómetro Small (1 atm):} \quad k = \frac{\mu \bar{q} l}{A} \quad 3.4$$

En el diseño del permeámetro se usó una válvula reguladora de presión de precisión tipo 100LR, tamaño de los puertos de  $\frac{1}{4}$ ", rango de presión de salida de 0.5 - 25 psi (5 - 175 kPa.), y presión máxima de entrada de 50 psig. Este regulador fue adquirido a la compañía ControlAir Inc. de los EE.UU., de Norteamérica, la cual tiene como función principal recibir una presión de entrada entre 20 - 50 psig y entregar una presión de salida constante, dependiendo de la posición del tornillo regulador.





**FIGURA 3.3. REGULADOR DE PRESIÓN DE PRECISIÓN**

El regulador de presión multi-etapa Tipo-100 es de alta precisión. Este controlador de presión provee el nivel más alto de exactitud de regulación y repetibilidad disponible. El Tipo-100 es ideal para aplicaciones extremas de control y de máxima estabilidad bajo variables condiciones de operación. Una capsula de acero inoxidable es utilizada como un elemento sensitivo para activar el servo de alta del mecanismo de control balanceado en el cual la válvula principal es controlada por una válvula piloto. Esto permite obtener una mayor exactitud y elimina muchos de los problemas asociados con reguladores convencionales que usan un rango de soportes y diafragmas (2).

### **3.4. Sistema de medición de temperatura**

La temperatura se mide mediante un termómetro de mercurio cuya escala es de 14 - 37 °C y se encuentra ubicado en un orificio en la parte superior de la celda porta núcleos, ajustado con un caucho para impedir fugas de gas y para medir la temperatura de entrada al core, que normalmente es la temperatura promedio del laboratorio en el cual esta ubicado el permeámetro.

Esta temperatura sirve para determinar la viscosidad del gas utilizado para atravesar el núcleo, en la tabla 1 tenemos viscosidades para el nitrógeno y en los anexos esta un diagrama para determinar viscosidades de dos gases, la cual es requerida en la ecuación que desarrolló H. Darcy en el año de 1856 para arenas no consolidadas y que mediante futuras modificaciones nos permitió calcular la permeabilidad de las rocas de una forma generalizada.

**TABLA 1****TEMPERATURA - VISCOSIDAD PARA EL NITRÓGENO MOLECULAR**

<b>T (°F)</b>	<b><math>\mu</math> (cp)</b>
65	0.01738
66	0.01741
67	0.01744
68	0.01746
69	0.01749
70	0.01752
71	0.01754
72	0.01757
73	0.01760
74	0.01762
75	0.01765
76	0.01768
77	0.01770
78	0.01773
79	0.01776
80	0.01778

**3.5. Sistema de medición de flujo**

Cada permeámetro se calibra individualmente y son provistos de curvas de calibración que dan el flujo de gas en centímetros cúbicos por segundo en función de la altura marcada por la esfera del flujómetro a una presión promedio establecida, las curvas de calibración son identificadas por el número de serie de cada permeámetro.

La presión de entrada a la cual los tres tubos han sido calibrados ha sido cuidadosamente seleccionada para evitar flujo turbulento de gas en las muestras a ser evaluadas. Si uno de los flujómetros se llega a dañar un nuevo tubo mas su flotador, adecuadamente calibrado, deberá ser instalado. Los tubos pueden ser removidos destornillando el sello en la parte superior del flujómetro.

### Derivación de la ecuación longitud vs. caudal de los flujómetros:

$$q = Av$$

$$v = \frac{l}{t} \Rightarrow q = A \frac{l}{t} \quad 3.5$$

$$P = \frac{F}{A}$$

$$F = m' \frac{l}{t^2} \Rightarrow P = \frac{m'l}{At^2} \Rightarrow t = \sqrt{\frac{m'l}{AP}} \quad 3.6$$

Reemplazando la ecuación 3.6 en la 3.5, tenemos:

$$q = \frac{Al}{\sqrt{\frac{m'l}{AP}}} = \frac{A^{3/2}P^{1/2}}{m'^{1/2}} l^{1/2} = Cl^{1/2}$$

o

$$l = C'q^2 \quad 3.7$$

$$C = \frac{A^{3/2} P^{1/2}}{m'^{1/2}}$$

donde:

q = caudal

l = distancia

A = área

m' = masa

P = presión

t = tiempo

v = velocidad

F = fuerza

C` =  $(1/C)^2$

### 3.6. Bombona de gas

El suministro de presión se puede suplir mediante bombonas de gas ya sea de nitrógeno (N<sub>2</sub>) que es el más recomendado o de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>). Estos reservorios mantienen el gas comprimido o energía almacenada para utilizarla en operaciones industriales o de laboratorio, además están equipadas con una válvula reguladora de presión que depende del tipo de gas.

Para nitrógeno la escala del regulador es de 0 - 500 psi (figura 3.4). Debido a este amplio rango de regulación es necesario utilizar otro regulador en el permeámetro, ya que el equipo maneja valores pequeños de presión (o de precisión) en relación a la generada por la bombona.



**FIGURA 3.4. BOMBONA DE GAS**

Otra alternativa a este suministro necesario de presión es utilizar la Bomba de Desplazamiento Positivo. Para mayor información revisar el capítulo 4.

### 3.7. Caja principal

El porta núcleo (1), prensa porta núcleo (2), termómetro (3), flujómetro de rango triple (4), manómetro (5), válvula reguladora de presión (6), válvula de tres vías (7), conexión de entrada de gas (8) están interconectados y ensamblados en un panel o caja principal (9) con un marco adecuado para la instalación de pared, tal como se muestra en la figura 3.5.

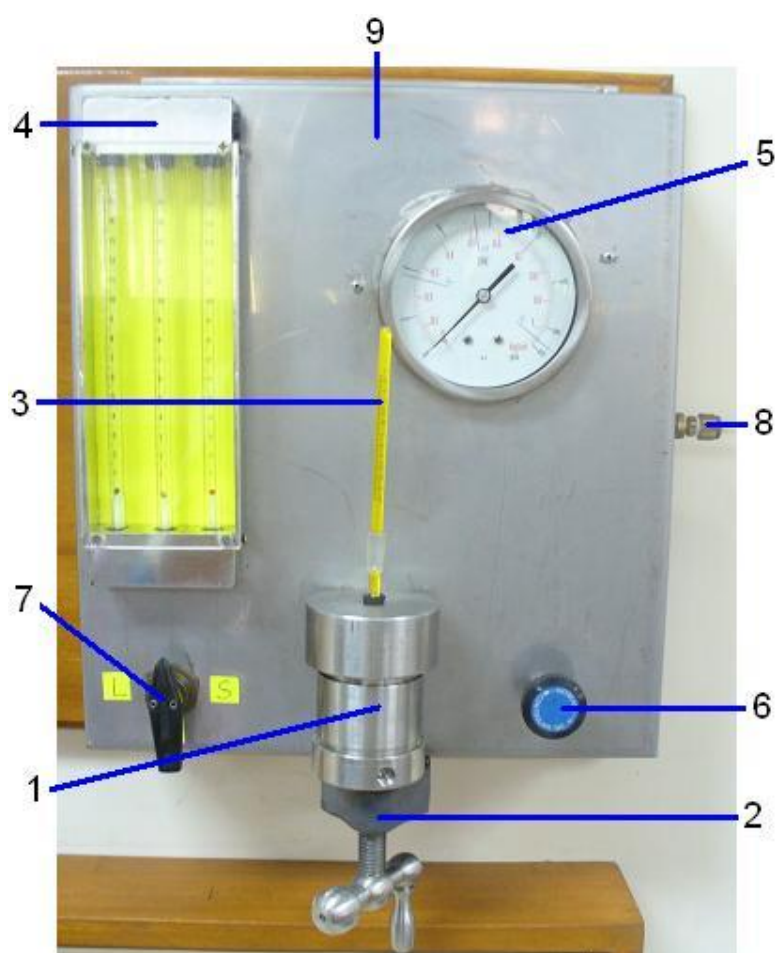


FIGURA 3.5. PERMEAMETRO DE GAS PARTE FRONTAL

Taladre tres huecos en un muro de carga a fin de que pueda sujetarse el instrumento con tres pernos a la pared. Debe tener mucho cuidado de que el permeámetro quede en posición vertical.

### **3.8. Accesorios**

Entre los accesorios utilizados en el diseño del permeámetro tenemos en primer lugar 16 neoplos de cobre de 1/4" (1), 3 metros de cañería de cobre de 1/4" (2), y 2 válvulas de alivio de cobre de 1/4" (3), revise la figura 3.6. Todos estos complementos enlazan y establecen comunicación internamente entre los instrumentos del equipo, deben estar bien ajustados colocando teflón en todas las uniones para evitar posteriores fugas y datos erróneos de permeabilidad.





**FIGURA 3.6. ACCESORIOS**

### **3.9. Calibración del equipo**

**Fugas en la cañería.-** Conecte la línea de suministro de presión al equipo. Cierre la válvula de alivio, para sellar la salida del regulador de presión hacia la atmósfera. Tapone el porta núcleo con una pieza de metal de tamaño adecuado para evitar el escape de aire.

Aplicar presión al instrumento a la máxima capacidad del manómetro y cierre la válvula reguladora. No desconecte la línea de presión del suministro durante la prueba de presión. Si no hay indicios de caída de presión el en manómetro en aproximadamente diez minutos, entonces el instrumento no tiene fugas.

Si la presión desciende, entonces revise todas las juntas con agua y jabón para determinar donde se encuentran las posibles fugas. Filtraciones en las líneas de la válvula de tres vías tiene muy poca influencia en las medidas de permeabilidad.

**Caucho de la celda porta núcleo.-** El caucho de la celda porta núcleo debe ser el adecuado ajustando y proporcionando al core barreras impermeables para que el gas pase exclusivamente por él o sino los datos de permeabilidad serán inexactos de acuerdo a las muestras referenciales las cuales se mencionan en la sección 3.11.

**Manómetro.-** Cada cierto tiempo se debe calibrar el manómetro por medio de la bomba de peso muerto.

**Celda porta núcleos.-** Debe asegurarse de que la entrada y salida de este instrumento no estén taponadas, haciéndole pasar agua destilada a presión.

### **3.10. Pruebas de laboratorio**

Para las pruebas de laboratorio primero se debe llevar a cabo la práctica “limpieza de núcleos con tolueno” mediante los siguientes pasos:

1. Armar el equipo soxhlet, el cual esta conformado por:
  - a. Reverbero o manto de calentamiento.
  - b. Balón (500 o 1000 ml.), lleno con 375 ml. de tolueno o éter.
  - c. Porta muestra.
  - d. Refrigerante.
  - e. Soporte universal.
  - f. Colocar lubriseal en todas las uniones.
  
2. Dejar las muestras con el reverbero a su máxima capacidad el tiempo necesario, hasta que los núcleos estén completamente limpios (tolueno limpio).

3. Poner las muestras en el horno convencional a una temperatura de 85 °C (185 °F) por un lapso de tiempo de 6 a 12 horas.
4. Colocar las muestras en el horno de vacío a una temperatura de 82 °C (180 °F) por un intervalo de tiempo de 6 a 18 horas. P = 20 psi.
5. Dejar los plugs en el desecador hasta el momento en el que se les vayan a determinar la permeabilidad.

Después que la muestra alcance temperatura ambiente, realizar el siguiente procedimiento:

- I. Medir la longitud y el área de sección transversal de la muestra a la cual se le requiere hallar la permeabilidad.
- II. Poner el plug en el caucho, luego colocarlos en la celda porta núcleo y ajustar este último al equipo por medio de la prensa porta núcleos.

- III.** Abrir la válvula de paso de la bombona de gas, después gire la válvula reguladora de presión del tanque en el sentido de las manecillas del reloj hasta alcanzar una presión entre 20 y 45 psi (50 psi es la presión máxima del regulador del permeámetro).
- IV.** La válvula triple que es la que da paso para que el gas llegue al flujómetro debe ubicarse en "large", y abrir la válvula reguladora de presión del permeámetro lentamente hasta que el manómetro lea 0.25 atmósfera (en el manómetro se denota con una L). Es aconsejable golpear ligeramente el vidrio del manómetro mientras se esta ajustando la presión. El rango adecuado en los tubos medidores de caudal es entre 20 y 140 divisiones. Si el flotador (esfera negra) en el tubo large pasa las 20 divisiones, entonces tome la correspondiente lectura. Si se mantiene por debajo, entonces debe colocarse la válvula triple en la posición "medium" y aumente la presión a 0.5 atm (M) por medio del regulador. Si la esfera plateada sobrepasa las 20 divisiones tome apunte de la altura alcanzada sino coloque la válvula triple en "small" y aumente la presión a 1 atm (S), luego anote la altura más próxima alcanzada por la esfera roja.

Este procedimiento deberá seguirse con mucho cuidado en todas las pruebas de cálculo de la permeabilidad para minimizar los posibles daños en los flotantes que podrían picarse en el momento que choquen contra el tope del tubo, debido a un rápido incremento del flujo por una repentina maniobra del regulador.

- V.** Con el dato de longitud obtenido en el paso anterior de los flujómetros debe dirigirse a la carta de longitud vs. caudal la cual se encuentra en los anexos (diagrama B). En esta carta debe ingresar con el valor de longitud horizontalmente hasta topar con cualquiera de las tres curvas dependiendo de la presión y luego baje verticalmente para obtener  $q$ .
  
- VI.** Leer la temperatura en el termómetro y hallar la viscosidad de la tabla 1.
  
- VII.** Con los datos de longitud, área, presión, caudal y viscosidad calcule la permeabilidad por medio de las ecuaciones 3.2, 3.3 o 3.4.

### **3.11. Comprobación de datos obtenidos**

Los días 15 y 16 de agosto del presente año realizamos una pasantía en el Laboratorio de Yacimiento de Petroproducción localizado en la ciudad de Quito pedida por medio de un oficio dirigido al Ing. Manuel Jordán, Subgerente de Exploración y Desarrollo de Petroproducción por el Ing. Ricardo Gallegos Orta, Decano de la FICT de esta Universidad.

En la mencionada práctica comprendimos a cabalidad la operación y funcionamiento del permeámetro de gas y todos los pasos que se deben seguir antes de calcular la permeabilidad de una muestra, tal como se describió en la sección 3.10.

Llevamos unas muestras (A, B, C, y D) tomadas del Campo Petrolero de Ancón. A estos núcleos se les determinaron sus valores de permeabilidad para que posteriormente pasen a ser muestras patrones o referenciales, las que nos permitirán realizar una calibración precisa del equipo diseñado.

Los valores de permeabilidad obtenidos en el Laboratorio de Yacimientos de Petroproducción se muestran en la tabla A de los anexos.

Y los valores de permeabilidad obtenidos en el Laboratorio de Petróleos de la FICT-ESPOL se muestran en la tabla B en el apéndice.