

## CAPÍTULO 4. PRUEBAS Y RESULTADOS

En el presente capítulo se va a realizar una serie de pruebas para comprobar el funcionamiento correcto del sistema, así como su grado de exactitud.

### 4.1 Pruebas

Se realizaron un total de 20 pruebas para cada valor de presión. El rango de valores para realizar la primer prueba fue de 1 psi hasta 10 psi, variando 1 psi entre cada muestra; la forma de tomar estas fue de la misma manera en que se tomaron para hacer la caracterización del sensor, así como para acondicionar la señal. Los valores obtenidos se muestran en la tabla 4.1 y 4.2.

CAMARA TRIAxIAL	PRUEBAS DE PRESIÓN EN SISTEMA DESARROLLADO (PSI)									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1 psi	1	1	1	1	1	1	1	1.1	1.1	1
2 psi	2	2	2	2	2	2	2	2.1	2.1	2
3 psi	3	3	3	3	3	3	3	3	3	2.9
4 psi	4.1	3.9	4	4	4	3.9	4	4	4	4
5 psi	5.1	5.2	5.1	5	5	5	5	5	5	5.1
6 psi	6	5.9	6	6	6	6	6	6	6	6
7 psi	7.1	7	6.9	7	7	7	7	6.9	7	7
8 psi	8	8	8	8	8	8	8	8.1	8	8
9 psi	9	9	9.2	9	9	9	9	9	9	9
10 psi	10	10.1	10	10	10	10	10	10.1	10	10

Tabla 4.1 Primer prueba obtenida del sistema terminado.

Como se puede observar, los valores obtenidos con el sistema desarrollado muestran una gran exactitud, lo cual vamos a analizar en la siguiente sección. Hay que recordar que el instrumento medidor de presión que utilizamos para tomar las muestras y compararlas (*Spec Scientific 840065*), sólo entrega valores pares, por lo que hace un

redondeo de la presión medida. Los valores obtenidos en las pruebas 4, 5 y 7 son iguales a los tomados por el medidor de presión *Spec Scientific 840065*.

La siguiente prueba fue hecha en orden inverso, es decir, empezando en 10 psi hasta llegar a 1 psi, esto para observar si hay problemas de histéresis. En la tabla 4.2 se muestra la comparación de los valores medidos con el medidor de presión *Spec Scientific 840065* y los obtenidos con el sistema desarrollado.

CAMARA TRIAXIAL	PRUEBAS DE PRESIÓN EN SISTEMA DESARROLLADO (PSI)									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
10 psi	10	10	10	10.1	10	10	10.1	10	10	10
9 psi	9.2	9	9	9	9	9	9	9	8.9	9
8 psi	8	8	8	8.1	8	8	8	8	8	8
7 psi	7.1	7	7	7.1	7	7	7.1	7	7	7
6 psi	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6
5 psi	5.1	5	5.2	5	5	5	5	5	5	5
4 psi	4	4	4	4	4	3.9	4	4	4	4
3 psi	3	3	3	3.1	3	3	3	3	3.2	3
2 psi	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
1 psi	1	1	0.9	1	1	1.1	1.1	1	1	1

Tabla 4.2 Segunda prueba obtenida del sistema terminado.

Como se puede observar los valores son muy cercanos a los obtenidos con el medidor de presión antes mencionado, en algunos casos como en las pruebas 2, 5, 8 y 10 es el mismo.

Se puede lograr que el 100% de las pruebas se obtenga el mismo resultado que en el medidor de presión utilizado, sólo que sería muy tardado, ya que la válvula de control que se abre para aumentar la presión es inexacta y no entrega valores constantes. En otras palabras, no existe un ángulo de giro constante para que varíe la presión de agua equitativamente. El método utilizado para medir la exactitud del sistema desarrollado fue eficaz, ya que nos podemos dar cuenta que el sistema es más sensible que el medidor de presión utilizado.

La planta hidráulica todavía no está funcionando al 100%, ya que sólo cuenta con 4 tuberías como se mencionó en el capítulo 1. Se tomaron 4 muestras sobre una tubería de

acrílico con diámetro de 1 in., ver figura 4.1; las pruebas se hicieron manipulando la válvula de control: abriéndola completamente, a  $-45^\circ$ , cerrándola un tiempo aproximado de 10 segundos y abriéndola después completamente, esto con el objetivo de que se almacenara más presión en el hidroneumático, y después liberando esa presión, esto es para observar el golpe de ariete. En la figura 4.2 se muestra la válvula de control.

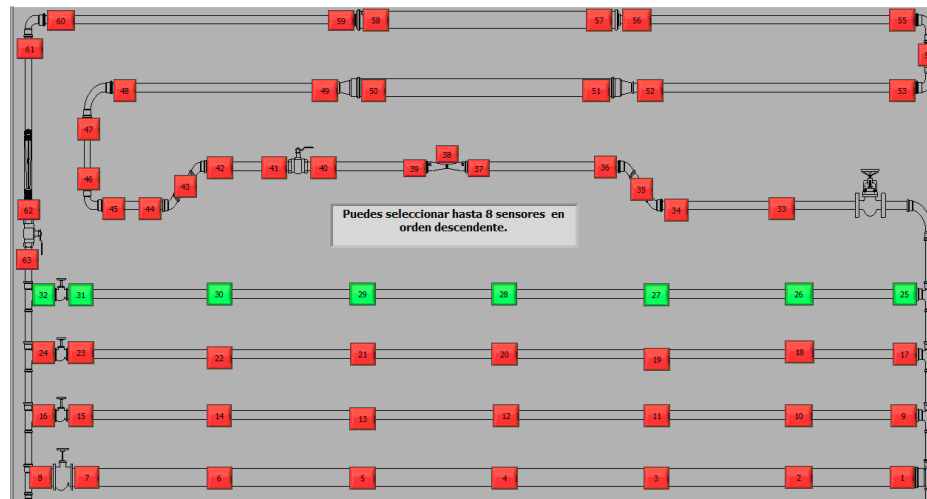


Figura 4.1 Diagrama de la tubería en donde se hicieron todas las muestras.

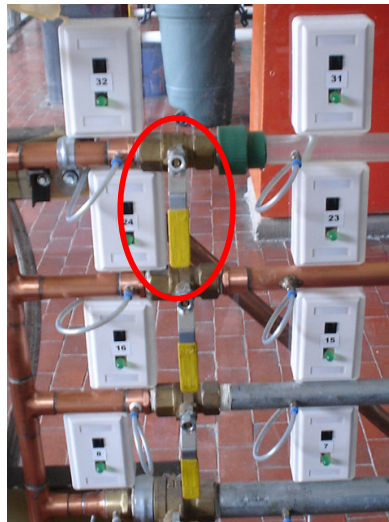


Fig. 4.2 Válvula de control utilizada para hacer las pruebas.

**Prueba número uno.**

Esta prueba se tomó con la válvula de control completamente abierta. En la figura 4.3 se muestra la presión capturada en los 8 sensores activos vistos en la figura 4.1.

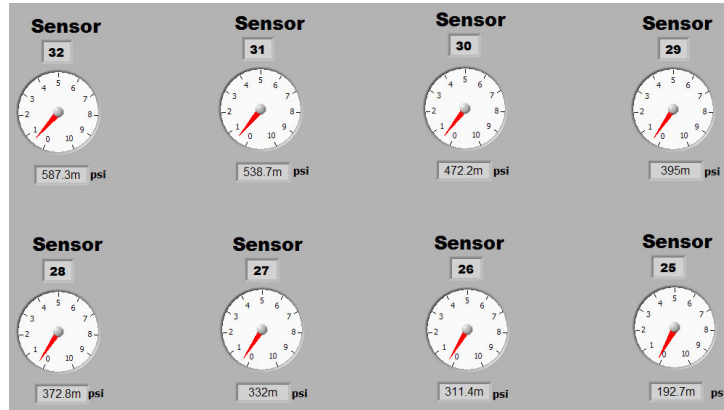


Fig. 4.3 Presiones medidas en prueba número uno

En la figura 4.4 se observa la gráfica obtenida de este efecto.

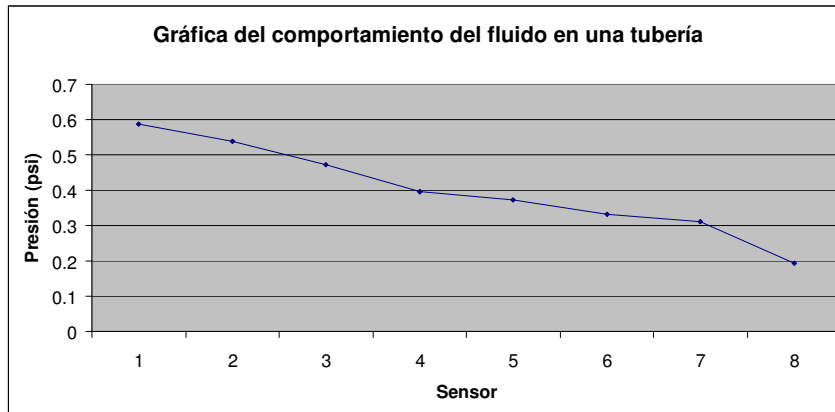


Fig. 4.4 Gráfica de la presión, de la prueba número uno, en la tubería de acrílico.

Se obtiene un comportamiento descendente, que era el esperado, esto se debe a que hay una caída de presión del sensor número 32 al número 25, en la gráfica se nombran como sensor número 1 al primer sensor de izquierda a derecha y así sucesivamente, formando un total de 8, los cuales son los instalados en una tubería.

**Prueba número dos.**

Esta prueba se hizo con la válvula de control a  $-45^\circ$ , esto con el objetivo de que no se liberara toda la presión del hidroneumático, se almacenara y saliera con más fuerza por la tubería, esto es parecido al efecto que se tiene cuando se obstaculiza con el dedo pulgar la manguera con presión de agua. En la figura 4.5 se muestran los indicadores de *Labview* y en la figura 4.6 la gráfica obtenida.

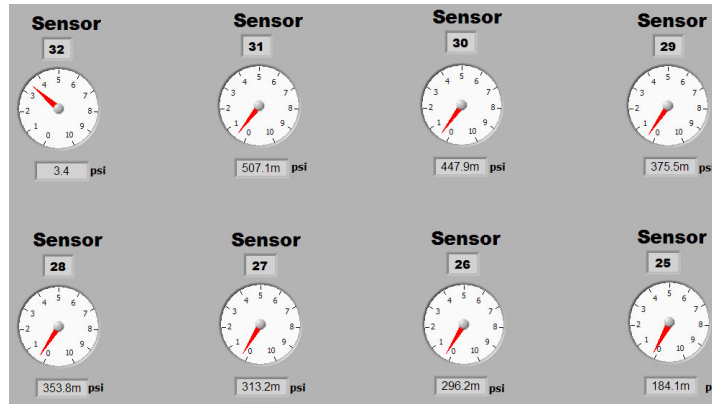


Fig. 4.5 Prueba realizada con válvula de control a  $-45^\circ$ .

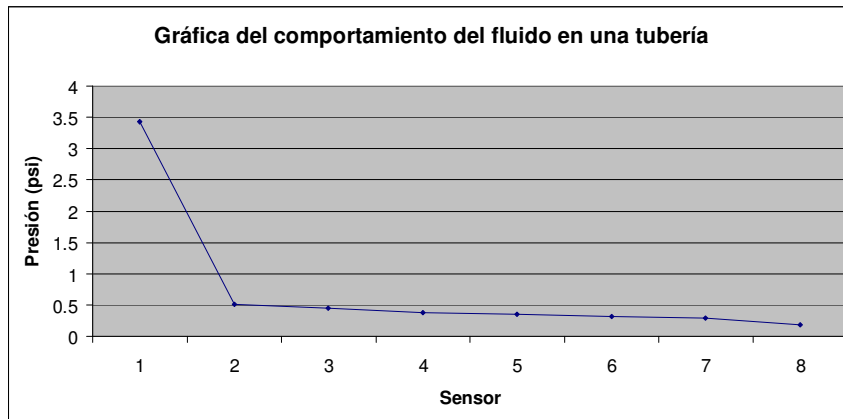


Fig. 4.6 Gráfica de la presión, de la prueba número dos, en la tubería de acrílico.

El primer valor de presión es más alto que los otros 7, esto es porque el primer sensor se encuentra antes de la válvula de control, como se muestra en la figura 4.1, es aquí en donde se almacena toda la presión del hidroneumático antes de ser liberada. Además se muestra que la gráfica se auto-ajusta perfectamente al rango de valores medidos.

**Prueba número tres.**

En la siguiente prueba, se cierra la válvula de control durante 10 segundos para que la presión de agua y aire se almacene en el hidroneumático, y después sea liberada bruscamente por la válvula al ser abierta. Las variaciones de presión son mostradas en la figura 4.7 y la gráfica de estas en la figura 4.8.

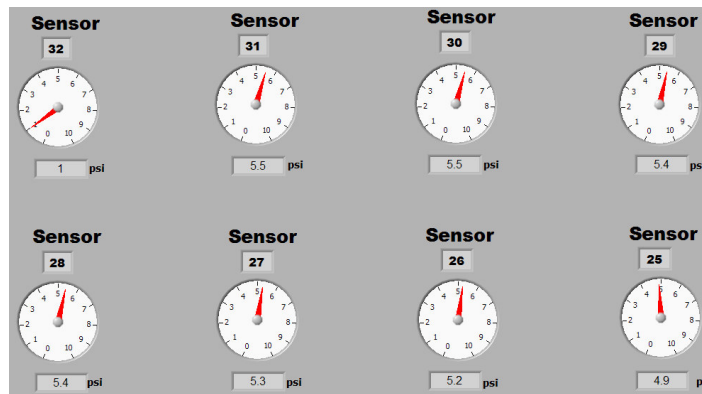


Fig. 4.7 Prueba realizada para observar el golpe de ariete.

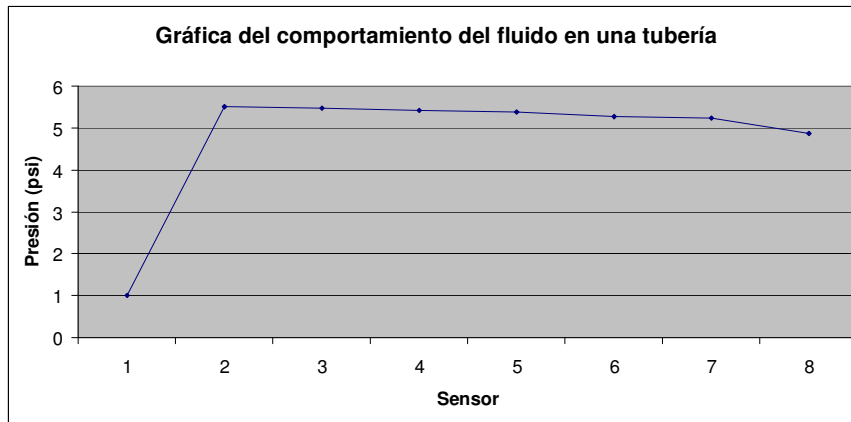


Fig. 4.8 Gráfica de la presión, de la prueba número tres, en la tubería de acrílico.

Esta prueba en particular fue difícil de capturar, ya bastaban 2 segundos aproximadamente para que se descargara la presión almacenada en el hidroneumático, ésta fue la mejor de las capturas ya que se realizan varias sin éxito, la captura se hacía ya que la presión estaba regular. Analizando la figura 4.8, concluimos del comportamiento de la presión, que es una aumento de repentino brusco con duración mínima. Ésta es la mayor presión que se puede extraer de la planta hidráulica, por lo

que no fue conveniente seguir haciendo pruebas; es necesario que se termine en su totalidad y que se cambie la bomba del hidroneumático o que se ponga una bomba directamente al contenedor de agua, con el propósito de que aumente la presión en las tuberías.

## 4.2 Resultados

Al graficar los datos obtenidos, observamos que los valores entregados por el sistema desarrollado se asemejan en gran medida a la curva ideal ( $x=y$ ). La siguiente gráfica es la obtenida de la tabla 4.1.

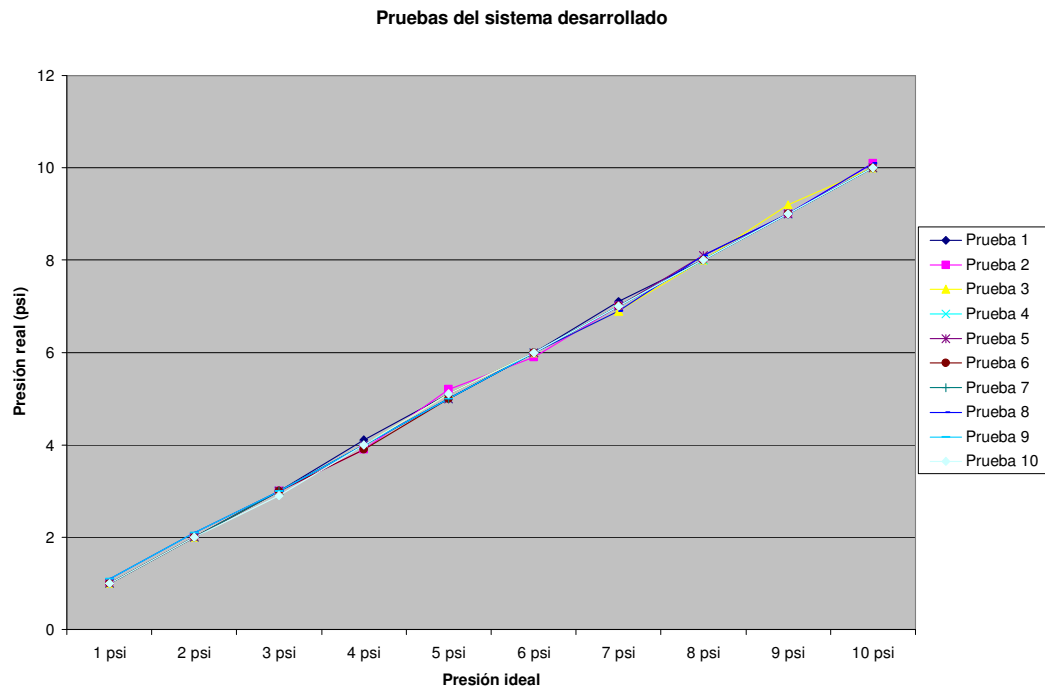


Fig. 4.9 Gráfica de la primer prueba del sistema desarrollado.

No se tomaron muestras del cero, ya que resultaba imposible lograr llegar a éste con la cámara triaxial de presión hidráulica. La razón de que la cámara triaxial de presión hidráulica no se pueda obtener un cero absoluto es que su forma de trabajar es mediante un cilindro el cual contiene agua que es impulsada mediante una membrana plástica, si el cilindro siempre tiene agua y dentro una membrana, siempre va a existir una presión

en el cilindro, la cual va a ser expulsada por la tubería donde se conectan el medidor de presión utilizado y el sistema desarrollado.

La siguiente figura muestra el comportamiento del sistema cuando es tomada la presión descendentemente de 10 psi hasta llegar a 1 psi; la gráfica fue extraída de la tabla 4.2.

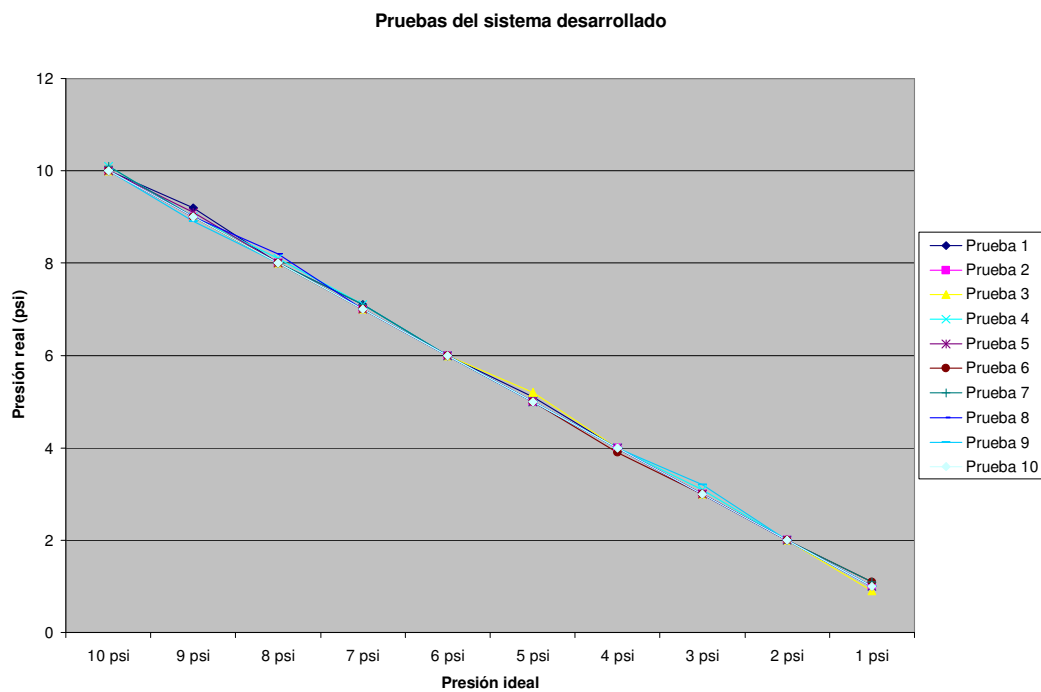


Fig. 4.10 Gráfica de la segunda prueba del sistema desarrollado.

La curva de la figura 4.10 no presenta histéresis, ya que sigue siendo altamente lineal. Los resultados graficados ya fueron presentados, ahora se mostrarán las especificaciones del sistema desarrollado.

**Campo de medida (*range*)**

Es el conjunto de valores que se encuentran entre los límites superior e inferior en los que se puede hacer la medida [10].



$$\text{Rango} = 0.112 \text{ psi} - 10 \text{ psi}$$

El fabricante del sensor de presión diferencial, Motorola, diseñó este dispositivo para soportar 7.25 psi y no se hace responsable de la exactitud del transductor cuando se sobrepasa este valor de presión, pero en realidad el sensor soporta hasta 200 kPa (29 psi). Al realizar las pruebas anteriores observamos que el sensor tiene un alto grado de precisión si se somete a 10 psi, por lo que se decidió trabajar en este rango. El valor mínimo de presión que el sensor nos entrega cuando no tiene conectado algo a los puertos es 0.112 psi, equivalentes a 5.791 mm Hg, y en voltaje es igual a 0.061 V, por lo que es comprensible tal offset.

**Alcance, fondo de escala (*span, input full scale -FS-*)**

Esta es la diferencia entre los límites superior e inferior de medida [10].

$$\text{Alcance} = 10 \text{ psi} - 0.112 \text{ psi}$$

$$\text{Alcance} = 9.888 \text{ psi}$$

Para definir la curva linealizada hay que obtener primero la recta de la curva de calibración. Obtenemos los valores promedio para cada variación de presión, como se muestra en la tabla 4.3, después obtenemos su gráfica, ver figura 4.3.

CAMARA TRIAxIAL	PRUEBAS DE PRESIÓN EN SISTEMA DESARROLLADO (PSI)										$\bar{X}$
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
1 psi	1	1	1	1	1	1	1	1.1	1.1	1	1.02
2 psi	2	2	2	2	2	2	2	2.1	2.1	2	2.02
3 psi	3	3	3	3	3	3	3	3	3	2.9	2.99
4 psi	4.1	3.9	4	4	4	3.9	4	4	4	4	3.99
5 psi	5.1	5.2	5.1	5	5	5	5	5	5	5.1	5.05
6 psi	6	5.9	6	6	6	6	6	6	6	6	5.99
7 psi	7.1	7	6.9	7	7	7	7	6.9	7	7	6.99
8 psi	8	8	8	8	8	8	8	8.1	8	8	8.02
9 psi	9	9	9.2	9	9	9	9	9	9	9	9.02
10 psi	10	10.1	10	10	10	10	10	10.1	10	10	10.02

Tabla 4.3 Tabla con valores promedio de cada variación de presión

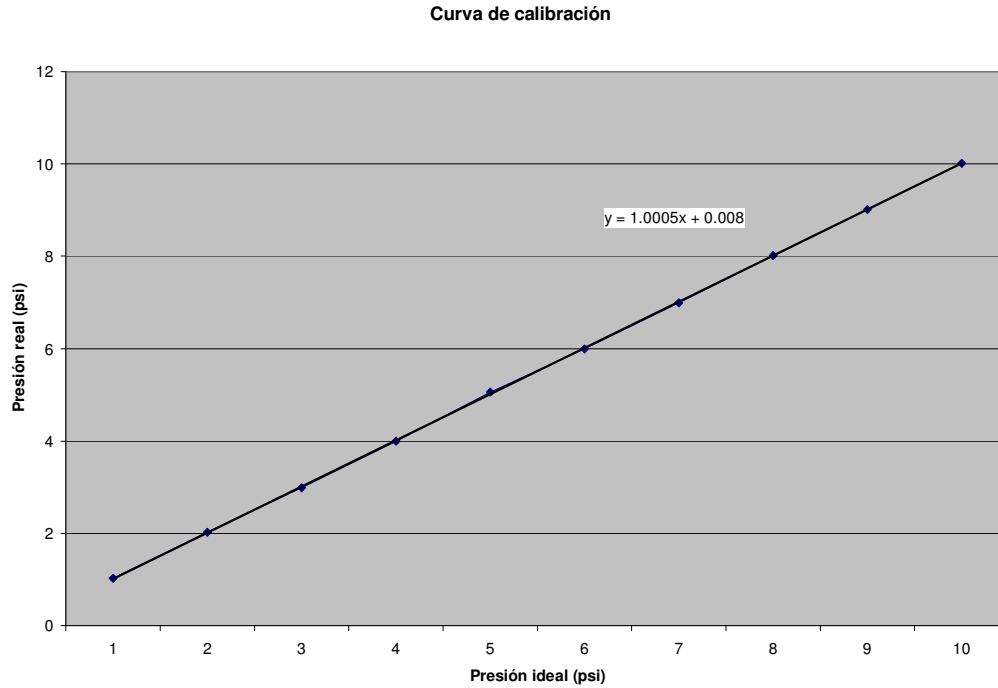


Fig. 4.11 Curva de calibración

Después obtenemos la ecuación de dicha recta:

$$y = 1.0005x + 0.008 \tag{4.1}$$

Como podemos ver, la ecuación de la recta de calibración es aproximadamente igual a la de una diagonal perfecta, que sería la curva ideal ( $y = x$ ).

**Sensibilidad (*sensitivity*)**

Se entiende por sensibilidad a la pendiente de la curva de calibración [10].

$$m = 1.0005$$

**No linealidad (*nonlinearity*)**

Es la máxima desviación de la curva de calibración con respecto a la línea recta por la que se ha aproximado [10]. Ver ecuación 4.2.

$$\text{No linealidad (\%)} = \frac{h}{X_s - X_1} (100) \quad (4.2)$$

Donde:

h: Desviación máxima con respecto a la curva de calibración

$X_s$ : Límite superior

$X_1$ : Límite inferior

Para obtener el valor de h, tenemos que extraer de la tabla 4.3, el valor de la máxima desviación con respecto a la curva de calibración; éste es 0.05, que es el valor del promedio de todas las pruebas tomadas en 5 psi, así tenemos que:

$$\text{No linealidad} = \frac{0.05}{10 - 0.112} (100)$$

$$\text{No linealidad} = 0.505 \%$$

### **Precisión (*accuracy*)**

Es el grado de concordancia entre los valores reales y los medidos [10]. La fórmula es la siguiente:

$$\% \text{ precisión} = \left| \frac{\text{valor\_medido} - \text{valor\_real}}{\text{valor\_real}} \right| \times 100 \quad (4.3)$$

Con la fórmula anterior obtenemos la siguiente tabla:

CAMARA TRIAxIAL	PRECISIÓN DE CADA MUESTRA (%)										Precisión $\bar{X}$
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
1 psi	0	0	0	0	0	0	0	10	10	0	2
2 psi	0	0	0	0	0	0	0	5	5	0	1
3 psi	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3.3333	0.3333
4 psi	2.5	2.5	0	0	0	2.5	0	0	0	0	0.75
5 psi	2	4	2	0	0	0	0	0	0	2	1
6 psi	0	1.6666	0	0	0	0	0	0	0	0	0.1666
7 psi	1.4285	0	1.4285	0	0	0	0	1.4285	0	0	0.4285
8 psi	0	0	0	0	1.25	0	0	1.25	0	0	0.25
9 psi	0	0	2.2222	0	0	0	0	0	0	0	0.2222
10 psi	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0.2
										Precisión total (%)	<b>0.6350</b>

Tabla 4.4 Precisión

Se puede observar en la tabla 4.4 que se estimó un valor de precisión obteniendo la precisión de cada prueba, después se hizo un promedio de todas las precisiones obtenidas en cada variación de presión, y finalmente se obtuvo un segundo promedio para obtener la precisión total, que es igual a 0.635 %.

En la figura 4.4 se muestran instalados 32 de los 63 sensores en la planta de presión hidráulica, la razón es por que no existen mas que 4 tuberías en la planta, en un futuro se instalarán las demás tuberías y los sensores restantes.



Fig. 4.12 Sensores instalados en la planta hidráulica.

A continuación se muestra la forma de realizar una captura de la presión de 8 sensores. En las figura 4.13 y 4.14 se expone la forma de conectar los sensores al sistema de instrumentación electrónica desarrollado, y en la figura 4.7 se muestra el sistema de instrumentación virtual funcionando.



Fig. 4.13 Captura de la presión de una tubería.



Fig. 4.14 Sistema conectado a su máxima capacidad.



Fig. 4.15 Sistema de instrumentación virtual funcionando.