I. ANEXO B

Este apartado está constituido por las siguientes partes

I.1. Calibración de transductores de presión

I.1.1. Descripción del banco de calibración

I.1.2. Protocolo de ensayo

I.1.3. Resultados experimentales

I.2. Calibración de los sensores de desplazamiento

I.2.1. Descripción del banco de calibración

I.2.2. Protocolo de ensayo

I.2.3. Resultados experimentales

B.1. Calibración de transductores de presión

B.1.1. Descripción del banco de calibración

El banco diseñado y construido para la calibración de transductores está constituido por los siguientes subconjuntos:

- ***Cámara de presurización*** (1) - equipada con:
  - Manómetro de presión tipo Bourdón (2) de 200 mm de diámetro.
  - Tomas y adaptadores para conectar los transductores de presión a calibrar
  - Válvula de purga y ajusta (4)
- ***Grupo de presurización*** – Esta unidad está compuesta por cuatro componentes básicos:
  - Bomba manual de desplazamiento volumétrico positivo tipo pistón (5)
  - Válvula antirretorno (6)
  - Válvula de control direccional 2/2 (7)
  - Válvula limitadora de presión (seguridad) (8)
- ***Unidad electrónica*** – Esta unidad está constituida por:
  - Fuente de alimentación (9)
  - Tarjeta de acondicionamiento de la señal de salida (10)
  - Voltímetro digital (11)

En la figura B-1 se encuentra un esquema de la citada instalación y en la figura B-2, una foto del montaje descrito.

B.1.2. Protocolo de ensayo

Para la calibración de los transductores de presión, se ha procedido con el siguiente protocolo de ensayo:

1. Instalar el transductor de presión en la cámara de presurización
2. Rellenado de aceite y purgado de aire de la cámara de presurización
3. Alimentar el transductor de presión con la tensión nominal aconsejada por el fabricante (24 voltios).
4. Comprobar que el voltímetro digital marca un valor de voltaje equivalente a la presión atmosférica (de acuerdo con una calibración entregada por el fabricante)

5. Presurizar la cámara con la ayuda de la bomba manual y ajustar valores enteros de la presión con la ayuda de la válvula de ajuste.

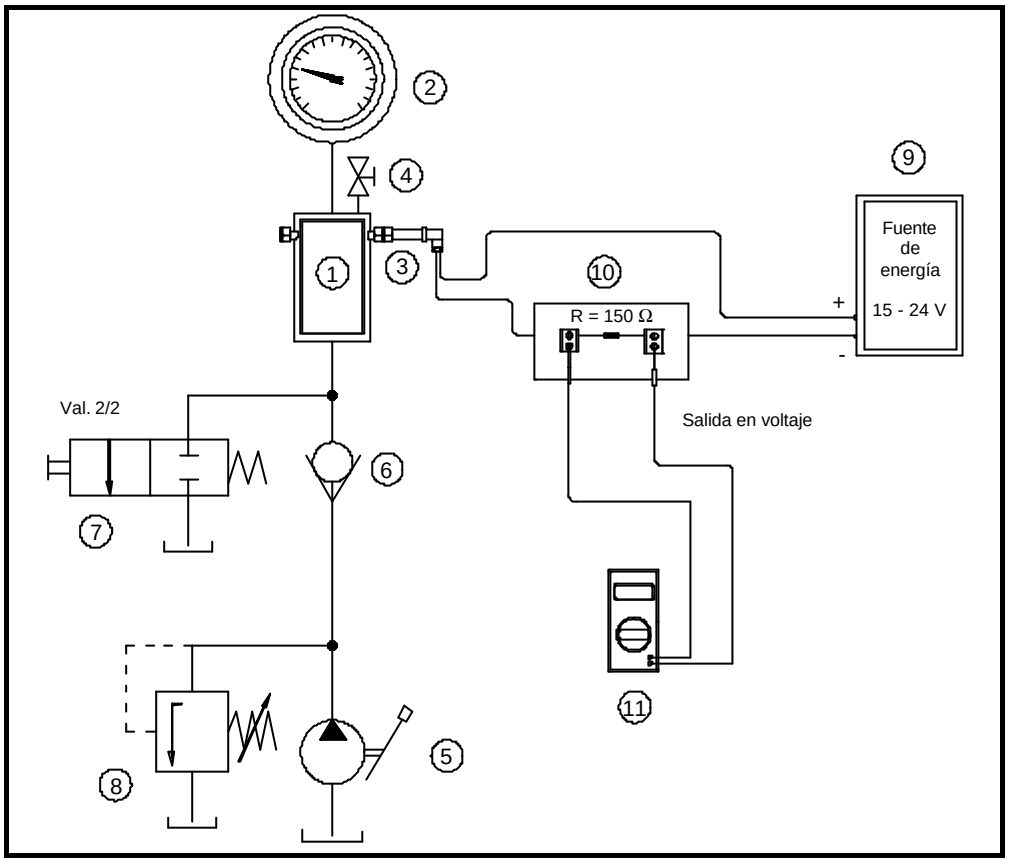

Figura B-1 – Esquema del banco de calibración de los transductores de presión

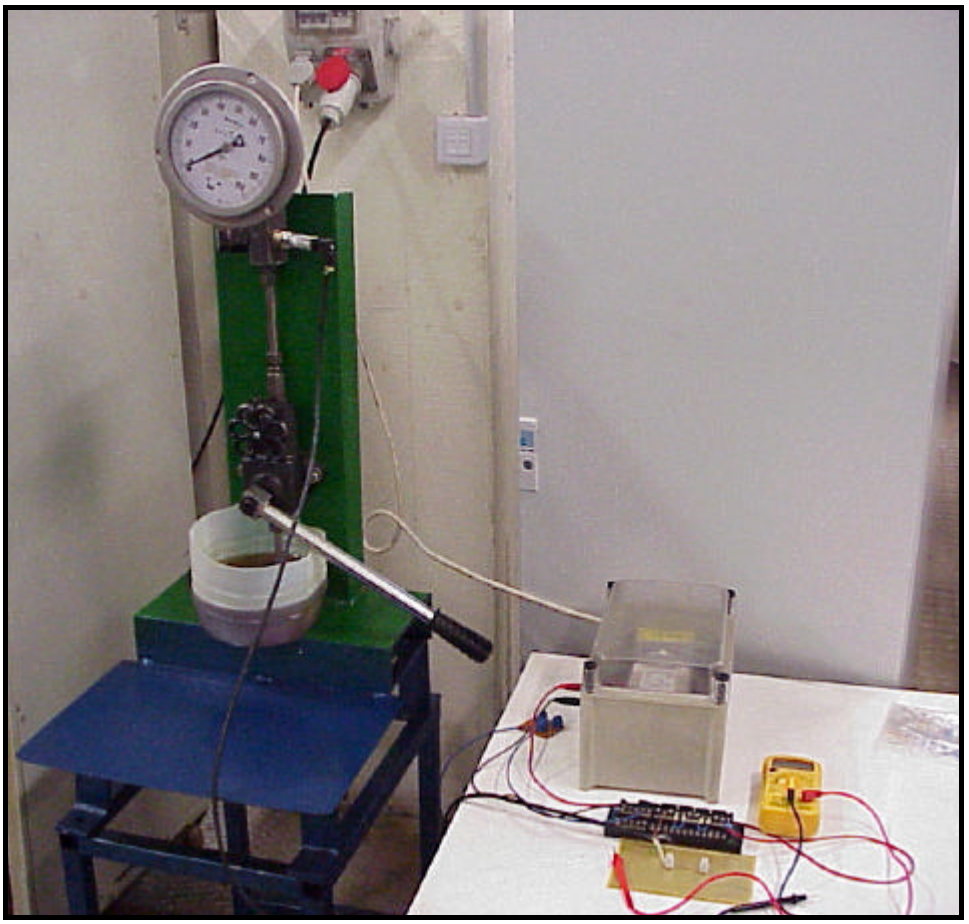

Figura B-2 Foto del banco de calibración

6. Lectura de la presión que marca el manómetro Bourdón y el voltímetro digital.
7. Repetir los pasos 5 y 6 hasta el valor de presión máxima deseada
8. Representar gráficamente los valores obtenidos de presión P (bar) y voltaje V (voltios).
9. Calcular la línea de ajuste de los resultados experimentales y el coeficiente de correlación.
10. Validar la curva de calibración sólo si su coeficiente de correlación se supera a 0.99. En caso contrario, repetir la prueba, y si persiste la tendencia, rechazar el transductor.

B.1.3. Resultados experimentales

Los transductores de presión utilizados en la fase experimental de la tesis doctoral, han sido los siguientes:

Referencia	*Rango de presión*
A	0 –250 bar
B	0 –400 bar
C	0 –100 bar
D	0 –100 bar
E	0 –250 bar
F	0 –100 bar

Todos ellos con las siguientes características comunes:

Alimentación / Salida = 8 – 28 voltios / 4 – 20 mA (2 hilos)

Linealidad = ±0.2 % (típica) / ±0.5 % (máxima)

Todos estos transductores se han calibrado en la instalación descrita en el apartado I.1.1 y de acuerdo con el protocolo descrito en el apartado I.1.2

Los ensayos de calibración correspondiente a los transductores de presión utilizados han dado las siguientes ecuaciones de ajuste (Tabla B-1) y su representación gráfica (ver figura B-3).

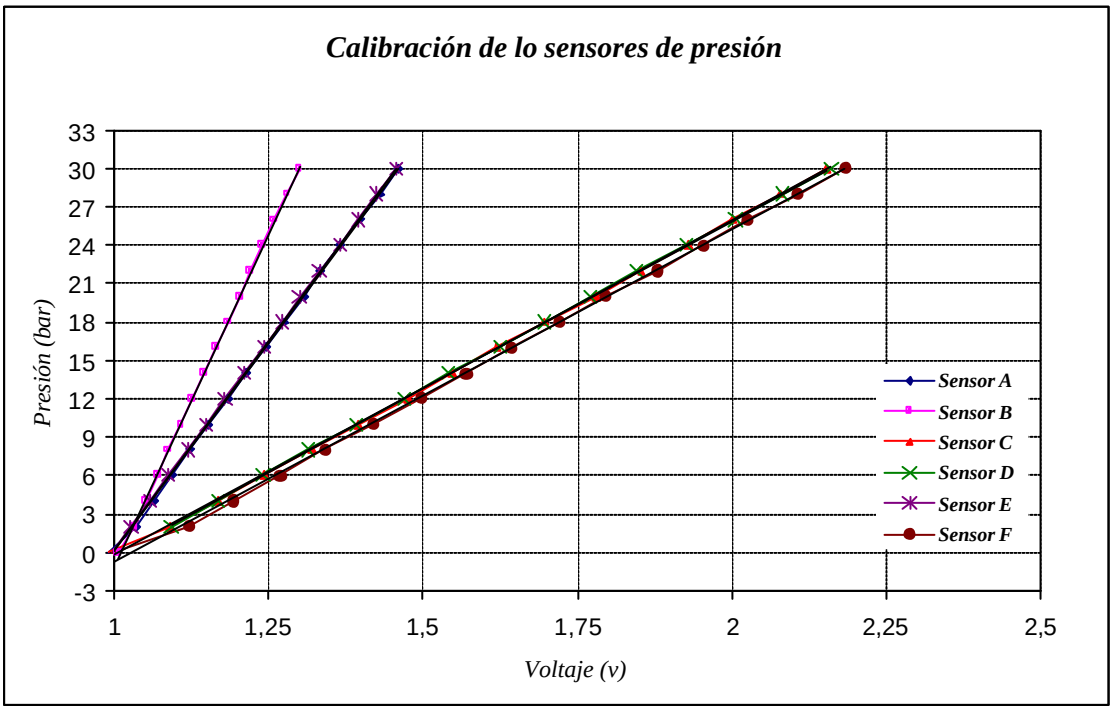

Figura B-3 – Representación gráfica de los transductores de presión

Ecuaciones de ajustes de los transductores de presión		
Referencias	***Ecuaciones***	***Ajuste (R^2)***
A	$P = 65.120V - 65.121$	$R^2 = 0.9996$
B	$P = 104.66V - 105.94$	$R^2 = 0.9996$
C	$P = 26.129V - 26.375$	$R^2 = 0.9996$
D	$P = 26.266V - 26.591$	$R^2 = 0.9999$
E	$P = 65.310V - 65.095$	$R^2 = 0.9999$
F	$P = 26.001V - 26.788$	$R^2 = 0.9992$

Tabla B-1

Calibración de los sensores de desplazamiento

B.1.4. Descripción del banco de calibración

El banco diseñado y construido para la calibración de los sensores de desplazamiento está constituido por los siguientes subconjuntos:

- ***Grupo de presión*** – Está unidad está compuesta por los siguientes componentes:
  - Bomba de engranajes (1)
  - Válvula de control de dirección 4/3 (2)
  - Válvula limitadora de presión (3)
  - Válvula reguladora de caudal (4)
- ***Mesa de calibrado*** – Este subconjunto está constituido por los siguientes componentes:
  - Actuador óleo-hidráulico (5)
  - Regla graduada milimétrica (6)
  - Sensor a calibrar de posición / desplazamiento (10)
- ***Unidad electrónica*** – Esta unidad está constituida por:
  - Fuente de alimentación
  - Tarjeta de acondicionamiento de la señal de salida
  - Voltímetro digital (8)

En la figura B-4 se encuentra un esquema de la citada instalación.

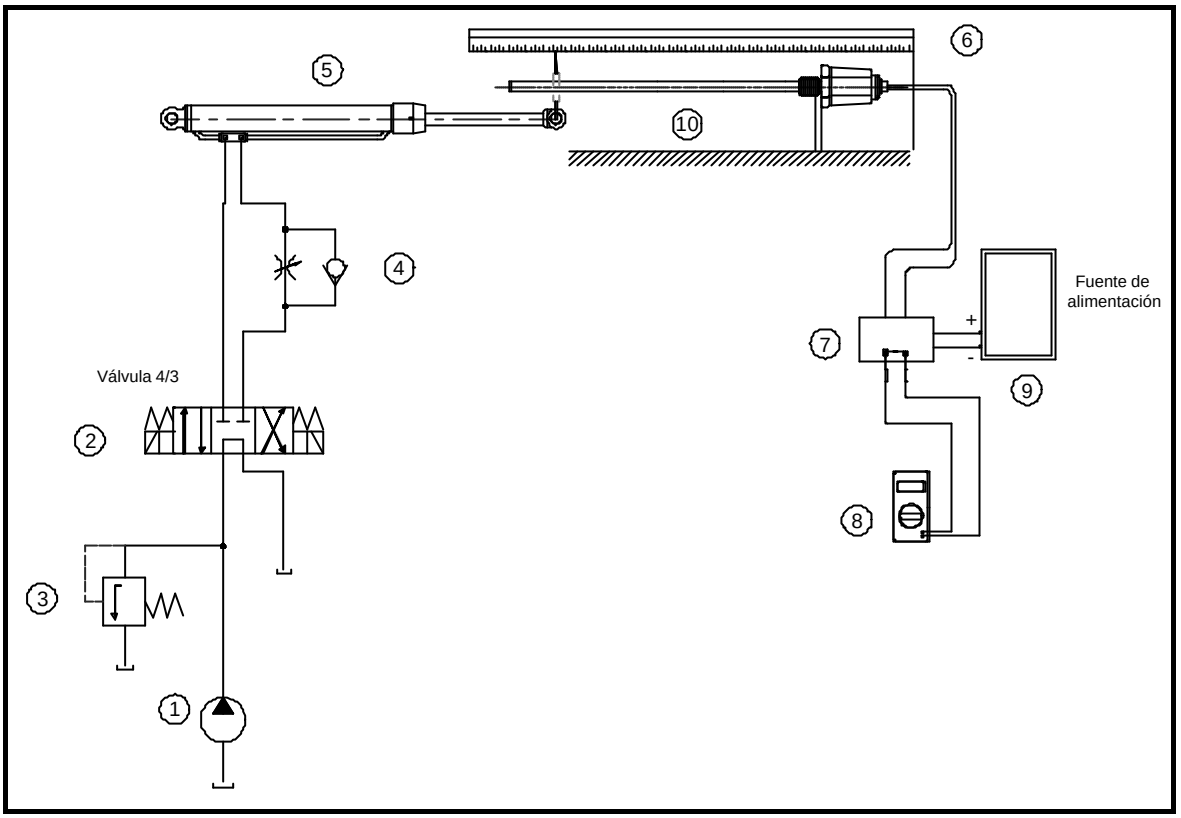

Figura B-4 – Esquema del banco de calibración de los sensores de desplazamiento

B.1.5. Protocolo de ensayo

Para la calibración de los sensores de desplazamiento utilizados en esta tesis se ha procedido con el siguiente protocolo de ensayo:

1. Instalar el sensor de desplazamiento en la mesa de calibración.

En este caso, hay que tomar las precauciones necesarias, para que la disposición de los componentes coincida con la máxima precisión en la disposición utilizada en los ensayos del mecanismo base, y asegurarse el paralelismo entre el actuador hidráulico y el sensor de desplazamiento.

2. Verificar el funcionamiento correcto de la unidad hidráulica.

En caso de detectar un funcionamiento irregular (salida a trompicones), revisar conexiones y purgas.

3. Alimentar el sensor de desplazamiento con la tensión nominal aconsejada por el fabricante (24 voltios).
4. Poner en marcha el grupo óleo-hidráulico y proceder con la válvula de control direccional 4/3 a bloquear el actuador en distintas posiciones a lo largo de la carrera.

5. Para cada posición, medir la posición que marca la regla milimetrada y el voltímetro digital
6. Repetir estas mediciones para un mínimo de 20 posiciones distintas
7. Repetir tres veces los pasos 5 y 6
8. Representar gráficamente los valores de desplazamiento (X – mm) y V (voltaje) obtenidos.
9. Calcular la línea de ajuste de los resultados experimentales y el coeficiente de correlación. Calcular la línea de ajuste de los resultados experimentales y el coeficiente de correlación.
10. Validar la curva de calibración sólo si su coeficiente de correlación se supera a 0.99. En caso contrario, repetir la prueba, y si persiste la tendencia, rechazar el transductor.

B.1.6. Resultados experimentales

Los sensores de desplazamiento utilizados en la fase experimental han sido marca Temposonics R – Series Analógicos que tienen las siguientes características:

Modelo	*Rango de medida*
Temposonics – RP Colocado en el cilindro de elevación	50 – 600 mm
Temposonis – RH Colocado en el cilindro de inclinación / volteo	50 – 935 mm

Todos con las características comunes siguientes:

Alimentación / salida = 0 – 10 voltios / 4 – 20 mA

Linealidad = < 0.02% F.S.(mínimo ± 50 µm)

Repetibilidad = < 0.001% F.S.(mínimo ± 2.5 µm)

Histerisis = < 4 µm

Todos estos sensores de desplazamiento se han calibrado en la instalación descrita en el apartado I.2.1 y de acuerdo con el protocolo descrito en el apartado I.2.2

Los ensayos de calibración correspondiente a los sensores de desplazamiento utilizados, han dado las siguientes ecuaciones de ajuste (tabla B-2) y su representación gráfica (figura B-5)

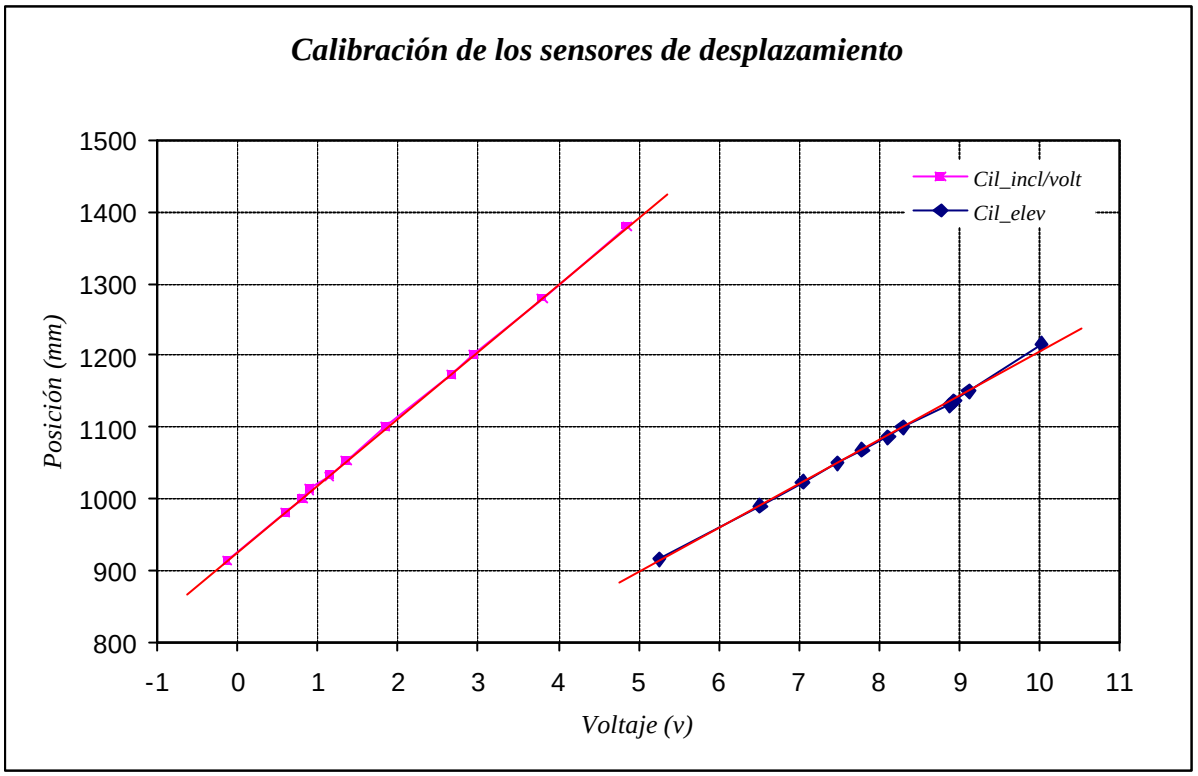

Figura B-5 – Representación gráfica de los sensores de desplazamiento

Ecuaciones de ajustes de los sensores de desplazamiento		
Referencias	***Ecuaciones***	***Ajuste (R^2)***
Temposonics RP (cilindro de elevación)	$X = 61.892V + 586.84$	$R^2 = 0.9979$
Temposonics RH (cilindro de inclinación / volteo)	$X = 93.485V + 925.45$	$R^2 = 0.9998$

Tabla B-2