



INSTITUTO UNIVERSITARIO AERONAUTICO

INSTRUMENTACIÓN DEL MOTOR STIRLING PROTOTIPO

Informe Técnico: DMA-031/13

Revisión: /

Proyecto: Fonarsec INTIHUASI

Fecha: 05/12/2013

Autor:

Ing. Diego Llorens

Revisó:

Ing. Esteban Gonzales



INSTRUMENTACIÓN DEL MOTOR STIRLING PROTOTIPO

Por:

Ing. Diego Llorens

RESUMEN

Dentro del proyecto de desarrollo llevado a cabo por el Consorcio Público Privado Intihuasi, en el que el Instituto Universitario Aeronáutico es parte, patrocinado por el Fondo de Innovación Tecnológica Sectorial de Energía Solar 2010 que administra el Fondo Argentino Sectorial (FONARSEC), se instrumentó el motor Stirling prototipo para poder medir los principales parámetros termodinámicos y mecánicos del mismo. Las variables que se pueden medir con la configuración del sistema de adquisición adoptado son las siguientes:

1. Temperatura crítica del calentador
2. Temperatura del regenerador en la parte caliente
3. Temperatura del regenerador en la parte fría
4. Presión interna del motor (medida en la parte fría del regenerador)
5. Velocidad de giro del cigüeñal del motor

El software de adquisición guarda de manera automática los parámetros medidos en un archivo de datos.

Córdoba, 5 de Diciembre de 2013



INDICE

	Pág.
Instrumentación del motor stirling prototipo.....	1
RESUMEN.....	1
INDICE	2
1. INTRODUCCIÓN	3
2. DESARROLLO.....	3
2.1. Mediciones de temperaturas	3
2.2. Mediciones de presión	6
2.3. Mediciones de cinemáticas	9
2.4. Medición de potencia	10
2.5. Sistema de adquisición de datos.....	10
3. CONCLUSIONES	11
4. REFERENCIAS.....	12
ANEXO A.....	1



1. INTRODUCCIÓN

A partir de la selección preliminar ⁽¹⁾ del sistema de adquisición de datos y de los sensores para instrumentar el motor Stirling prototipo se realizó una revisión de los mismos y se procedió a armar el sistema de medición para el motor. A continuación se presentan los sensores elegidos junto a una descripción del modo de operación del software de adquisición.

2. DESARROLLO

La propuesta inicial del sistema de medición para el motor Stirling prototipo preveía la medición de las variables físicas listadas en la Tabla 1. Se realizó una revisión de esta tabla para adecuarla a las necesidades actuales del proyecto y poder adquirir los sensores necesarios.

Nº	Símbolo	Variable	Rango aprox.	Frecuencia de medición
1	Tc	Temperatura del gas en la zona de compresión	300 – 400 K	1 Hz
2	Te	Temperatura del gas en la zona de expansión	750 – 950 K	1 Hz
3	Pc	Presión en la zona de compresión	0,6 – 1,5 Bar	400 Hz
4	Pe	Presión en la zona de expansión	0,6 – 1,5 Bar	400 Hz
5	Tkr	Temperatura en la conexión entre el enfriador y regenerador	300 – 400 K	1 Hz
6	Trh	Temperatura en la conexión entre el regenerador y calentador	750 – 900 K	1 Hz
7	Pkr	Presión en la conexión entre el enfriador y regenerador	0,6 – 1,5 Bar	400 Hz
8	Prh	Presión en la conexión entre el regenerador y calentador	0,6 – 1,5 Bar	400 Hz
9	Theta, θ	Posición angular	0 – 360 °	1800 Hz
10	ω	Velocidad angular	3.000 rpm	1 Hz
11	C	Cupla		1 Hz
12	Δ	Oscilación del motor		1 Hz

Tabla 1 – Lista de variables físicas a medir en el motor Stirling prototipo – Tomado de Ref. (1)

2.1. Mediciones de temperaturas

El relevamiento de las temperaturas del motor se redujo de cuatro a dos debido a la dificultad para la instalación de las termocuplas en la zona de expansión y de compresión del motor, ya que no estaban previstos una zona de acople para dichas sondas de medición. Por lo tanto se decidió medir las siguientes temperaturas:

- Temperatura en la conexión entre el enfriador y regenerador (T_{kr})
- Temperatura en la conexión entre el regenerador y calentador (T_{rh})

Adicionalmente, se decidió monitorear la temperatura crítica del calentador para evitar que el mismo entre en una condición crítica por el bajo punto de fusión de material utilizado para construirlo.

2.1.1. Selección de los sensores de temperatura

Para la medición de las temperaturas en las conexiones del regenerador se utilizaron dos termocuplas Tipo K ⁽¹⁾ con vaina de acero inoxidable de 2 [mm] de diámetro y 150 [mm] de longitud (Figura 1). Para medir la temperatura crítica del calentador se utilizó una termocupla también Tipo K pero con terminal para poder montarla usando un tornillo.



Figura 1 – Termocupla de vaina utilizada para las mediciones de temperatura

2.1.2. Acondicionadores de señal para termocuplas

A la señal eléctrica que generan las termocuplas es necesario amplificarla para llevarla a valores normales para la placa de adquisición (en este caso, la placa de adquisición acepta señales de -10 [V] a +10 [V]). Para ello se utilizó un acondicionador de señal marca Novus modelo TxRail – 10 V ⁽²⁾ que transforma la señal de la termocupla en un voltaje regulado entre -10 [V] y +10 [V] (Figura 2). Este acondicionador necesita una alimentación externa de una fuente de voltaje continuo de entre 18 y 35 [Vdc]. El esquema de conexión entre la termocupla y el acondicionador de señal se muestra en la Figura 3.



Figura 2 – Acondicionador de señal para termocuplas Novus – TxRail – 10V

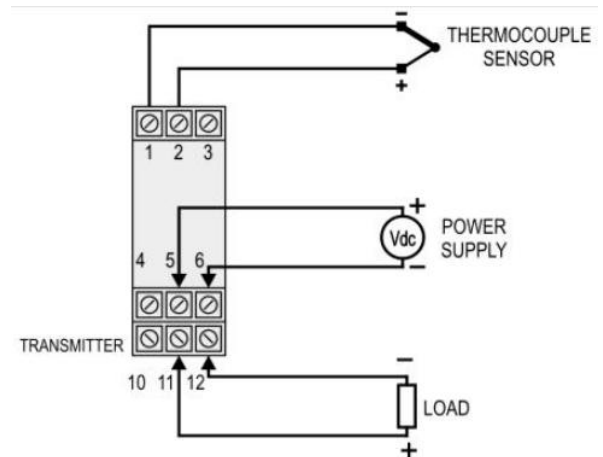


Figura 3 – Esquema de conexión del acondicionador de señal y la termocupla

2.1.3. Instalación de sensores en el motor

Para instalar las termocuplas en el motor se utilizó un acople roscado con virola estándar (Racor) como el que se muestra en el Figura 4. En la Figura 5 se muestra el montaje final de las termocuplas en el motor.



Figura 4 – Acople roscado con virola (racor) utilizado para montar las termocuplas

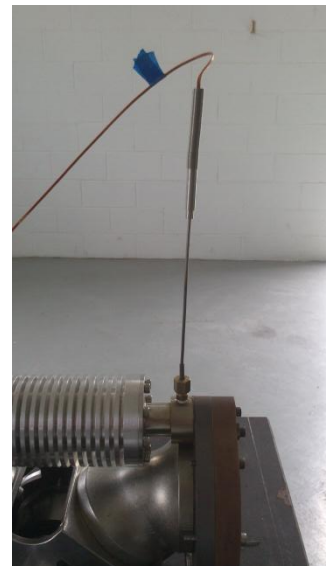


Figura 5 – Montaje de la termocupla en la parte caliente del regenerador

2.1.4. Calibración y conexión con la placa de adquisición

Para poder utilizar el conjunto termocupla – acondicionador de señal se realizó un ensayo de calibración con un horno de laboratorio para tratamiento térmico. Se colocaron las termocuplas dentro del horno y se realizaron las mediciones ajustando la temperatura mediante los controles del mismo. Para ambas termocuplas se obtuvo la misma curva de calibración que se muestra en la Figura 6.

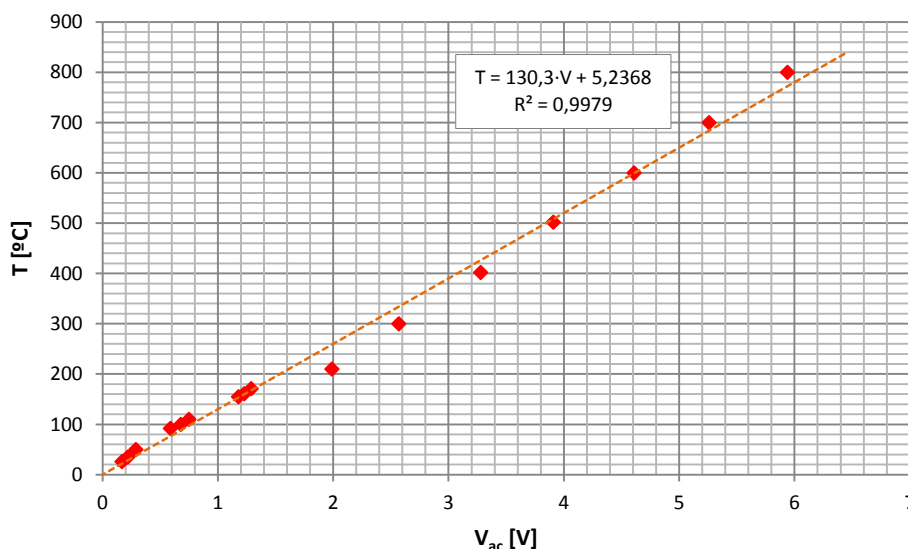


Figura 6 – Curva de calibración para las termocuplas Tipo K con acondicionador de señal Novus TxRail – 10V

2.2. Mediciones de presión

Al igual que para el caso de las mediciones de temperatura, las mediciones de presión se redujeron debido a dos inconvenientes:

- Dificultad para instalar los sensores de presión en las zonas de compresión y expansión
- Disponibilidad de sensores adecuados para realizar mediciones de presión de manera dinámica en un fluido que se encuentra a alta temperatura

Como los cambios de presión tienden a igualarse en todo el motor y debido a la disponibilidad de un sensor de presión dinámico para mediciones en cámaras de combustión de motores alternativos, se decidió realizar una única medición de la presión interna del motor en la parte fría del mismo. Esta ubicación del sensor responde a la temperatura máxima que el mismo puede soportar.

2.2.1. Selección del sensor de presión

El sensor de presión disponible es de la marca Kistler, modelo 6117B - F107 (Figura 7). Este sensor es del tipo capacitivo por lo que requiere de un acondicionador de señal especial para transformar las señales emitidas por el sensor como valores de carga eléctrica en una señal analógica convencional. Las características principales de este sensor se muestran en la Tabla 2.



Figura 7 – Sensor de presión Kistler 6117B – F107

Rango	bar	0 ... 200
Rango calibrado parcial	bar	0 ... 50
Sobrecarga	bar	250
Sensibilidad a 200 °C	pC/bar	~ -15
Frecuencia natural	kHz	~ 130
Linealidad	%FSO	< +/- 0,6
Rango de temperatura	°C	< 350
Cambio de sensibilidad a 200 +/- 50 °C	%	< +/- 1,5

Tabla 2 – Características del sensor Kistler 6117B - F107

2.2.2. Acondicionador de señal para sensor de presión

El acondicionador de señal para el sensor de presión es de la marca Kistler, modelo 5011B (Figura 8). El mismo convierte las señales emitidas por el sensor en una salida de analógica de -10 [V] a +10 [V]. En la Tabla 3 se muestran las características principales de este amplificador.



Figura 8 – Amplificador de carga eléctrica Kistler 5011B

Rango de medición para 10 V FS	pC	+/- 10 ... +/- 999 000
Sensibilidad del sensor [T] (M.U. = Mechanical units)	pC/M.U.	+/- 0,01 ... +/- 9990
Escala [S]	M.U./V	0,001 ... 9 990 000
Voltaje de salida	V	+/- 10
Corriente de salida (Protegida de corto circuito)	mA	+/- 5
Impedancia de salida	Ω	10
Rango de frecuencia	kHz	~ 0 ... 200
Filtro pasa bajos	kHz (%)	0,01 ... 30 (+/- 10)
Frecuencia de corte alta -3dB		
Constante de tiempo (Filtro pasa alto)		
Larga	s	> 1000 ... 100 000
Media ($T = R_g \cdot C_g$)	s	1 ... 10 000
Corta ($T = R_g \cdot C_g$)	s	0,01 ... 100
Error		
< +/- 100 pC FS (max./typ.)	%	< +/- 3 / < +/- 2
> +/- 100 pC FS (max./typ.)	%	< +/- 1 / < +/- 0,5
Linealidad	% FS	< +/- 0,05
Drift a 25 °c	pC/s	< +/- 0,07

Tabla 3 – Características principales del amplificador de carga Kistler 5011B

2.2.3. Instalación del sensor de presión en el motor

El sensor de presión se instaló en el motor mediante un acople fabricado a medida como se muestra en las Figura 9 y Figura 10. Las dimensiones del mismo se encuentran en el Anexo A.

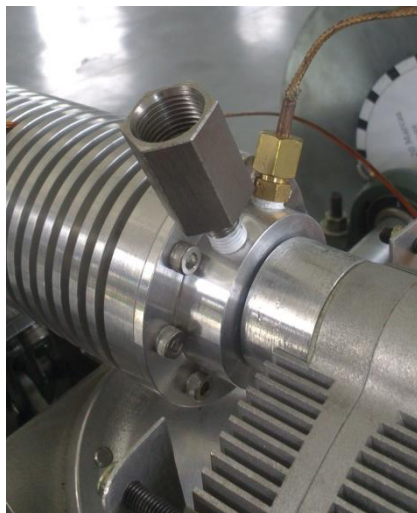


Figura 9 – Punto de montaje del sensor de presión en la parte fría del regenerador



Figura 10 – Acople para el montaje del sensor de presión en el motor



2.2.4. Calibración y conexión con la placa de adquisición

El sensor de presión viene con un certificado de calibración de fábrica en el que se indican los valores de sensibilidad y linealidad que se muestran en la Tabla 4.

Rango de calibración		Sensibilidad	Linealidad
bar		pC / bar	< +/- % FSO
0 ... 200	(23 °C)	-16,07	0,13
0 ... 50	(23 °C)	-15,94	0,09
0 ... 150	(200 °C)	-16,41	0,19
0 ... 50	(200 °C)	-16,29	0,08

Tabla 4 – Valores de sensibilidad y linealidad calibrados – Kistler 6117B-F107 No. 1594425

El amplificador de carga se debe configurar con el valor de sensibilidad del sensor, la escala a utilizar para el rango de voltaje de la señal de salida del mismo y la constante de tiempo a utilizar. Para la sensibilidad se ingresa alguno de los valores provisto en la Tabla 4 mientras que para la escala se ingresa la relación entre el máximo valor de presión a leer y el voltaje de salida máximo del amplificador. Por ejemplo, para una lectura máxima de 50 [bar] y 10 [V] de salida, el valor de escala a ingresar sería de 5 [bar/V]. La constante de tiempo define la velocidad de lectura del sistema; el manual del amplificador de carga especifica los siguientes lineamientos generales para la selección de la constante de tiempo:

- Procesos cuasiestático: Medición de proceso aperiódico y transiente de varios minutos de duración: Usar **Constante de tiempo larga**
- Mediciones dinámicas: Medición de procesos periódicos o cuasi-periódicos, por ejemplo curvas de presión, aceleración, etc.: **Constante de tiempo media** 1 ... 10000 [seg] ó **Constante de tiempo corta** 0,01 ... 100 [seg]

Para las mediciones de presión del motor Stirling prototipo se configuró el amplificador de carga con los siguientes valores:

- Sensibilidad: -15,94 [pC/bar]
- Escala: 5 [bar/V]
- Constante de tiempo corta: 0,01 ... 100 [seg]

El sensor de presión se conecta al amplificador de carga y desde este último se conecta la salida de voltaje a la placa de adquisición.

2.3. Mediciones de cinemáticas

La medición de la posición y velocidad angular del cigüeñal se llevo a cabo usando el sistema propuesto en el diseño preliminar del sistema de medición del motor (Ref. (1)). El mismo está compuesto por un encoder incremental construido usando un sensor óptico CNY70. Al tratarse de un encoder incremental la posición angular es relativa y por lo tanto es necesario conocer una referencia inicial del cigüeñal.

El disco marcado del encoder se montó sobre el volante de inercia del motor como se muestra en la Figura 11. El mismo se dividió con 20 marcas para los 360 °, con lo que cada cuenta del encoder representa un desplazamiento angular de 18°.

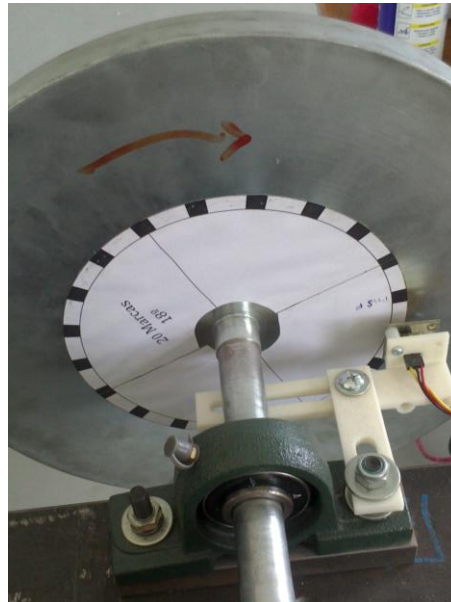


Figura 11 – Instalación del encoder incremental para medir la velocidad de giro del cigüeñal

2.4. Medición de potencia

El sistema de medición de potencia propuesto ⁽¹⁾ estaba basado en la utilización de un motor eléctrico brushless como generador eléctrico. Sin embargo, debido a las pérdidas por fricción que introduce el mismo en el mecanismo del sistema ⁽³⁾ se decidió desconectarlo. Por lo tanto, se tuvo que descartar este método para medir la potencia.

Como forma alternativa para la determinación de la potencia generada se propuso utilizar el método indirecto tradicional basado en la integración del ciclo indicado de presión – volumen.

Para futuros ensayos se está desarrollando un freno mecánico para realizar las mediciones de potencia disponible en el eje.

2.5. Sistema de adquisición de datos

La placa de adquisición de datos utilizada es de la marca Measurement Computing modelo USB-1208FS mientras que el software utilizado para monitorear y almacenar los datos en la computadora está desarrollado usando el programa de National Instruments LabVIEW tal como se describe en Ref. (1) y (4). Al software desarrollado se le ajustó el método de adquisición digital del contador correspondiente al encoder de rotación de la posición del cigüeñal y se varió levemente la interfaz (Figura 12) para ajustarla a los nuevos requerimientos de medición planteados anteriormente. En la Figura 13 se muestra como quedaron configuradas las entradas analógicas y digitales de la placa de adquisición con las correspondientes señales de los sensores.

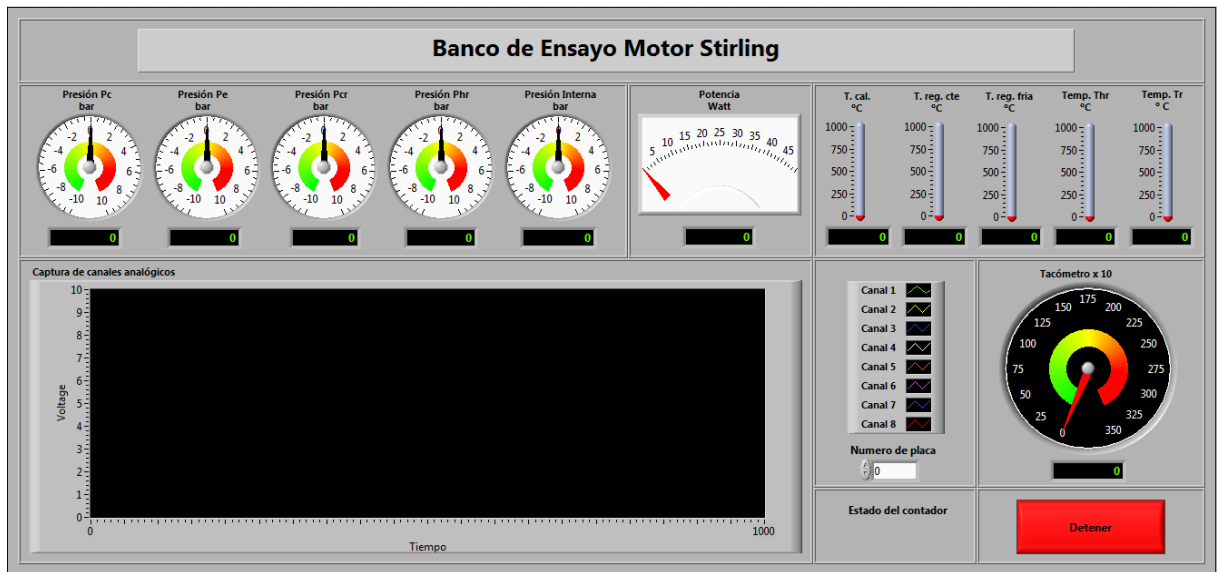


Figura 12 – Interfaz actualizada del software de adquisición para el motor Stirling

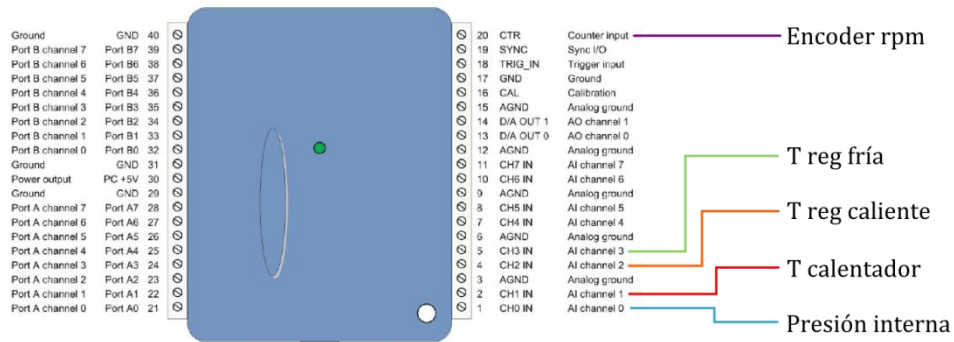


Figura 13 – Mapa de conexiones para el software de adquisición del motor Stirling

Al iniciar la ejecución del software se pide un nombre para un archivo de caracteres ASCII en el cual se almacenarán las mediciones. En este archivo se escriben los datos encolumnados de las señales medidas por los sensores a intervalos fijos de tiempo que se puede configurar desde la interfaz gráfica.

3. CONCLUSIONES

Se refinó la lista de variables a medir en el motor Stirling prototipo respecto de la propuesta inicial ⁽¹⁾ y se obtuvieron los sensores adecuados para realizar las mediciones. La lista final de parámetros a medir es:

1. Temperatura crítica del calentador
2. Temperatura del regenerador en la parte caliente
3. Temperatura del regenerador en la parte fría
4. Presión interna del motor (medida en la parte fría del regenerador)
5. Velocidad de giro del cigüeñal del motor



Además se configuró el sistema de adquisición de datos compuesto por la tarjeta de adquisición Measurement Computing modelo USB-1208FS y el programa LabView.

4. REFERENCIAS

1. **Carrasco, Diego.** *Definición de la campaña de ensayos del primer prototipo del motor Stirling. Medición de parámetros y sistema de adquisición de datos.* Departamento de Mecánica Aeronáutica, Facultad de Ingeniería, Instituto Universitario Aeronáutico. Córdoba : s.n., 2013. Informe técnico. DMA 018/13.
2. Temperature Transmitters TxBlock & TxRail - Signal Conditioners & Isolators. *Products - NOVUS Automation Inc.* [En línea] NOVUS Automation Inc., 2013. [Citado el: 21 de Agosto de 2013.] <http://www.novus.com.br/catalogos/?ID=806061>.
3. **Llorens, Diego.** *Medición experimental de las pérdidas por fricción del motor Stirling prototipo.* Departamento de Mecánica Aeronáutica, Facultad de Ingeniería - Instituto Universitario Aeronáutico. Córdoba : s.n., 2013. Informe Técnico. DMA 026/13.
4. **Jromei, Juan.** *Desarrollo de software de control del sistema de adquisición de datos para ensayos de motores Stirling prototipos.* Departamento de Mecánica Aeronáutica, Facultad de Ingeniería - Instituto Universitario Aeronáutico. Córdoba : s.n., 2013. Informe técnico. DMA 019/13.



ANEXO A

PLANOS DE ACOPLER PARA MONTAJE DE SENSORES

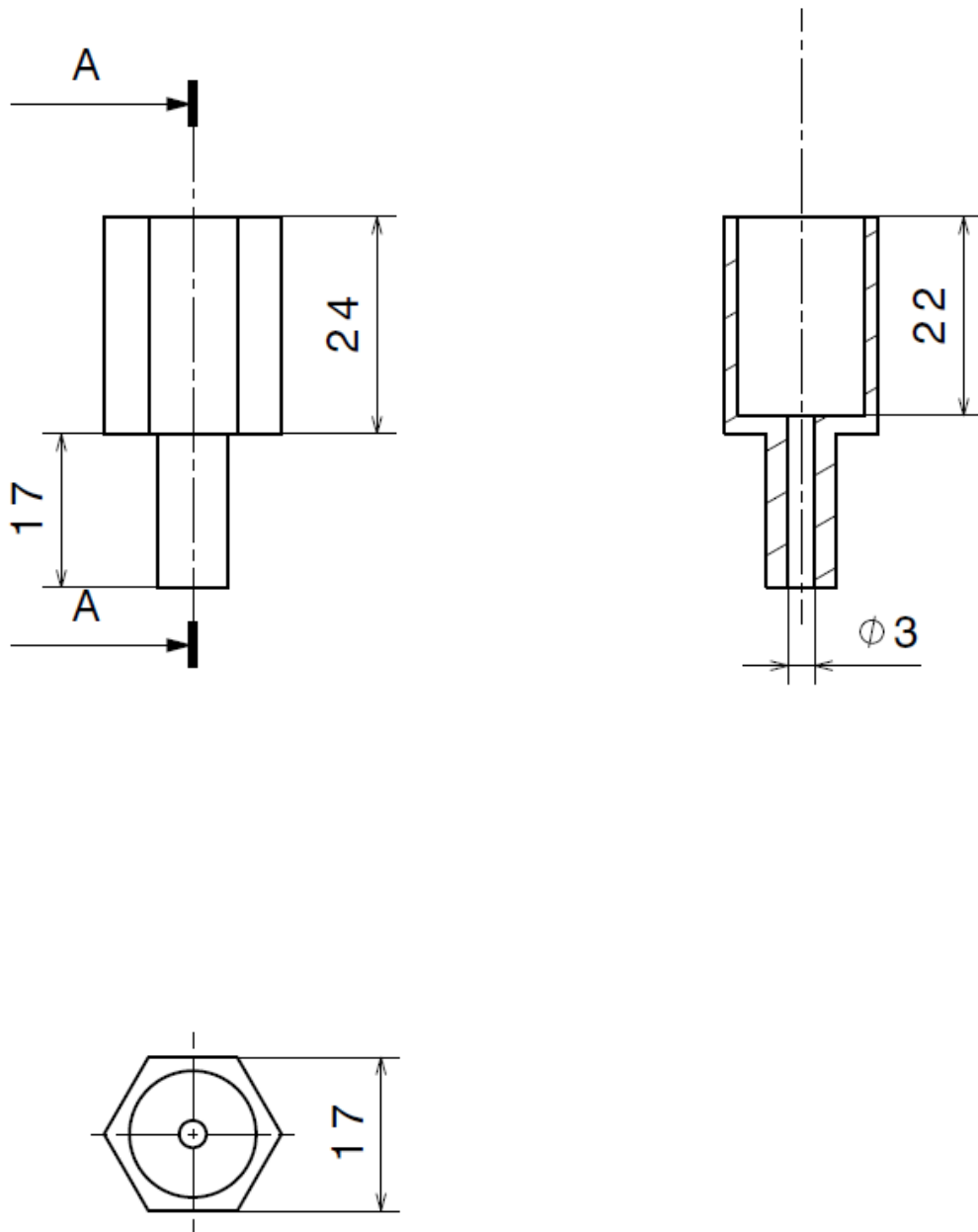


Figura A1 – 3 Vistas del acople para el sensor de presión Kistler 6117B-F107