

5 Validación y pruebas funcionales

Ningún proyecto de ingeniería está completo si no se especifica una batería exhaustiva de pruebas y ensayos que se deben realizar para verificar el funcionamiento correcto y conforme con las especificaciones del mismo. Si además, el proyecto incluye el desarrollo, la fabricación y la implementación de un equipo o sistema, las pruebas deben realizarse y los resultados obtenidos deben proporcionar la conclusión de que el funcionamiento es acorde con los requerimientos exigidos. En el presente capítulo se describen todas las pruebas realizadas al sistema de sensores de paso colectivo y velocidad angular de este proyecto. También se presentan en formato gráfico los resultados obtenidos, representando la variable de interés de cada sensor frente al tiempo transcurrido durante el experimento. Estos datos se recogieron durante el experimento en un formato de texto estándar *.txt* y posteriormente han sido convertidos a un formato legible por *MATLAB* para utilizar esta interfaz de tratamiento matemático para la representación y almacenamiento de los datos. La conversión se ha realizado a través de la aplicación *Microsoft Excel*, que es capaz de interpretar caracteres de texto y exportar filas y columnas de datos directamente como matrices en el entorno de *MATLAB*. Se ha elegido esta aplicación (*MATLAB*) porque en futuras etapas del proyecto *HERMES* se pretende utilizar la herramienta de modelado de sistemas *Simulink*, integrada en *MATLAB*, para generar leyes de control para las variables dinámicas del helicóptero.

El conjunto de pruebas realizadas se puede clasificar según múltiples criterios. En este documento, para presentar una exposición ordenada, se ha ideado una separación entre pruebas realizadas al sistema sensor de paso colectivo y pruebas realizadas al sistema sensor de velocidad angular. Además, dentro de cada sistema sensor existe una división de pruebas que comprueban distintos aspectos de funcionamiento del sistema. Así, en el sensor de paso colectivo se han realizado pruebas de todo el sistema accionando manualmente el mecanismo de paso y accionándolo mediante la excitación del servomotor a través de la emisora de radiofrecuencia. También se realizó una prueba específica para comprobar el cálculo correcto de la derivada del ángulo de paso. Por otro lado, en el sensor de velocidad angular se distingue entre las pruebas de validación del sensor óptico, en las que se demuestra que los valores de velocidad angular que proporciona son correctos, y las pruebas de validación del programa informático, en las que se comprueba que la adquisición de datos se produce correctamente y que éstos se almacenan en memoria como es debido.

Las pruebas se realizaron en las instalaciones de los laboratorios de Ingeniería de Sistemas y Automática, e Ingeniería Aeroespacial, de la Escuela Superior de Ingenieros de Sevilla. Se conectaron monitor y teclado a sus puertos correspondientes en la placa *Hércules*. A través de estos periféricos se realizaron las compilaciones de los códigos *“.c”*, se almacenaron los códigos fuente y los ejecutables en la memoria de la *Hércules*, y se ejecutaron los programas de adquisición de medidas. Los resultados se plasmaron en la pantalla en tiempo real y se almacenaron en memoria en formato *“.txt”*. Los archivos de datos se trasladaron a un sistema operativo *Windows*, utilizando el puerto USB de la *Hércules*, para su posterior análisis y edición. La *Hércules* y el monitor se alimentaron ambos de la red eléctrica de los laboratorios de 220 V. Para proporcionar tensión continua, que se fijó en 15 V, a la *Hércules*, se utilizó una fuente de tensión variable.

5.1 Pruebas del sistema sensor de paso colectivo

El sensor de paso colectivo fue sometido a tres bloques de pruebas fundamentales. En unas pruebas previas a estos tres bloques denominadas *pruebas de caracterización* comprobamos el funcionamiento correcto del potenciómetro y trazamos una curva característica del sensor. Esta curva se ha descrito en el capítulo “4 Sensor de ángulo de paso colectivo”. Permite relacionar las variaciones de tensión en el potenciómetro directamente con las variaciones de paso en las palas del rotor. Para estas pruebas no se empleó el programa informático que realiza la adquisición de datos en ninguna de sus versiones.

En el primer bloque de pruebas comprobamos el funcionamiento correcto del sistema de adquisición de datos utilizando la caja de aviónica y el programa *colecddsk.exe*. Este programa estaba en una fase intermedia de depuración y no contenía las instrucciones para calcular la derivada del paso en tiempo real. Para realizar las pruebas se accionó el mecanismo colectivo de forma manual, actuando directamente sobre las palas. El servomotor se movía forzado por un agente externo, y no quedó demostrado que pudiera operar correctamente con la oposición que genera todo el aparato del sensor. Estas pruebas proporcionaron los primeros resultados registrados de medidas, ya que el programa informático tenía las instrucciones para almacenar los datos de las medidas en memoria.

En el segundo bloque de pruebas comprobamos el funcionamiento correcto del sistema de adquisición de datos utilizando la caja de aviónica y el programa *colecddsk.exe*, accionando el mecanismo colectivo desde el servomotor. Para mover el servomotor se utilizó el equipo de radiofrecuencia descrito en el capítulo “2 Tecnologías empleadas y dispositivos utilizados”. En estas pruebas se comprobó que el servomotor es perfectamente capaz de accionar el mecanismo colectivo con todo el aparato sensorial conectado.

En el tercer bloque de pruebas comprobamos que el cálculo de la derivada del paso colectivo se realizaba correctamente. En estas pruebas se empleó el programa *dcolecddsk.exe*, versión final del programa de adquisición de datos de paso colectivo. El mecanismo de colectivo se accionó de nuevo desde las palas, manualmente. Los resultados satisfactorios de estas pruebas se consideran suficientes para determinar que el sensor de paso colectivo está operativo y cumple los requisitos fijados.

5.1.1 Pruebas de caracterización

En estas pruebas realizamos unas medidas preliminares sin utilizar la caja de aviónica. Los objetivos de las mismas fueron dos:

- Comprobar el funcionamiento según requisitos del potenciómetro.
- Establecer una relación funcional entre valores de tensión en el potenciómetro (voltios) y valores de paso colectivo (grados).

Para cumplir el primer objetivo se comprobó que el potenciómetro presentaba una variación continua de tensión proporcional al giro de su eje. Para cumplir el segundo objetivo se tomaron 5 medidas de ángulo de paso con su tensión correspondiente y se calculó una recta de regresión de las muestras.

El procedimiento A para el cumplimiento del primer objetivo se detalla a continuación:

- 1) Alimentar el potenciómetro con 10 V de tensión continua.
- 2) Conectar un polímetro en modo voltímetro a los terminales de tierra y variable del potenciómetro.
- 3) Girar el eje del potenciómetro y comprobar la variación proporcional de tensión en la pantalla del polímetro.

El procedimiento B para el cumplimiento del segundo objetivo se detalla a continuación:

- 1) Colocar las palas del rotor a un ángulo de paso colectivo de 0°. Se utilizaron dos referencias redundantes: un nivel colocado en la propia pala y unas marcas de referencia insertadas en la cabeza del rotor del helicóptero por el fabricante.
- 2) Conectar el potenciómetro a la alimentación de 10 V y al polímetro como en el procedimiento A.
- 3) Tomar la medida de tensión en el punto de paso de 0°.
- 4) Tomar medidas de tensión en los valores de paso (°) [12 6 -4 -8]. Para fijar el paso de la pala en estos valores se utilizan únicamente las marcas de referencia del fabricante.
- 5) Calcular la recta de regresión lineal de las cinco muestras.

En la siguiente página se muestran ilustraciones del material empleado durante las pruebas.



Figura 5.1: Nivel y voltímetro empleados

5.1.2 Pruebas con movimiento manual del mecanismo

En estas pruebas realizamos unas medidas utilizando la caja de aviónica y el programa de gestión de adquisición de datos *colecddsk* que no calcula la derivada del ángulo de paso en cada instante. El objetivo de las pruebas era comprobar el funcionamiento, según los requisitos del proyecto, del programa informático. En las pruebas previas de caracterización se había comprobado que el potenciómetro proporcionaba valores de tensión continua proporcionales al ángulo de paso de las palas del rotor. El mecanismo de paso colectivo se accionó manualmente realizando barridos que abarcaban todo el recorrido de paso de las palas. El resultado fundamental de las pruebas con movimiento manual del mecanismo es un archivo de medidas de paso colectivo en formato *.txt*. Estas medidas deben reflejar el patrón de movimiento inducido manualmente en el mecanismo de paso colectivo. El procedimiento para realizar la prueba se detalla a continuación:

- Requisito previo: El programa ejecutable *colecddsk.exe* debe haber sido cargado en la memoria flash de la placa *Hércules*.
- 1) Conectar el sensor al circuito de adquisición de la placa mediante el conector de 4 pines descrito en la **sección 4.4.2** de este texto. El potenciómetro recibe alimentación a través de este conector. Son necesarios un monitor y un teclado conectados a sus puertos periféricos correspondientes. La placa se alimenta mediante la fuente de tensión variable dedicada a dicha función. En el momento que recibe alimentación la placa entra en modo *arranque*.
- 2) Iniciar el sistema operativo *RTL Flash*. Se ejecuta el archivo */Home/padur/Enrique/colecddsk*. El archivo espera a que el usuario responda al mensaje de calibración del potenciómetro. Una vez calibrado el potenciómetro, el usuario pulsa *intro* y aparece en pantalla el menú principal del programa de medidas, descrito en la **sección 4.3.2** de este texto.
- 3) Arrancar las medidas y aparecen en pantalla una sucesión de muestras tomadas en tiempo real con el valor del paso colectivo (grados) y una *time tag*, o marca del instante en el que se ha tomado la muestra (ms).
- 4) Realizar movimientos de rotación de las palas en torno a su eje de paso colectivo, con velocidad uniforme, realizando todo el recorrido entre los topes del mecanismo. Comprobar en pantalla la evolución de las muestras, coherente con el movimiento aplicado.
- 5) Mantener las palas fijas en un punto de paso de valor conocido. Comprobar que las muestras reflejan el mismo valor de paso colectivo.
- 6) Detener las medidas pulsando 'P'. El archivo de texto con todas las muestras, y con el mismo formato que se presentó en pantalla en tiempo real, se genera automáticamente en */Home/padur/Enrique*.

Resultados

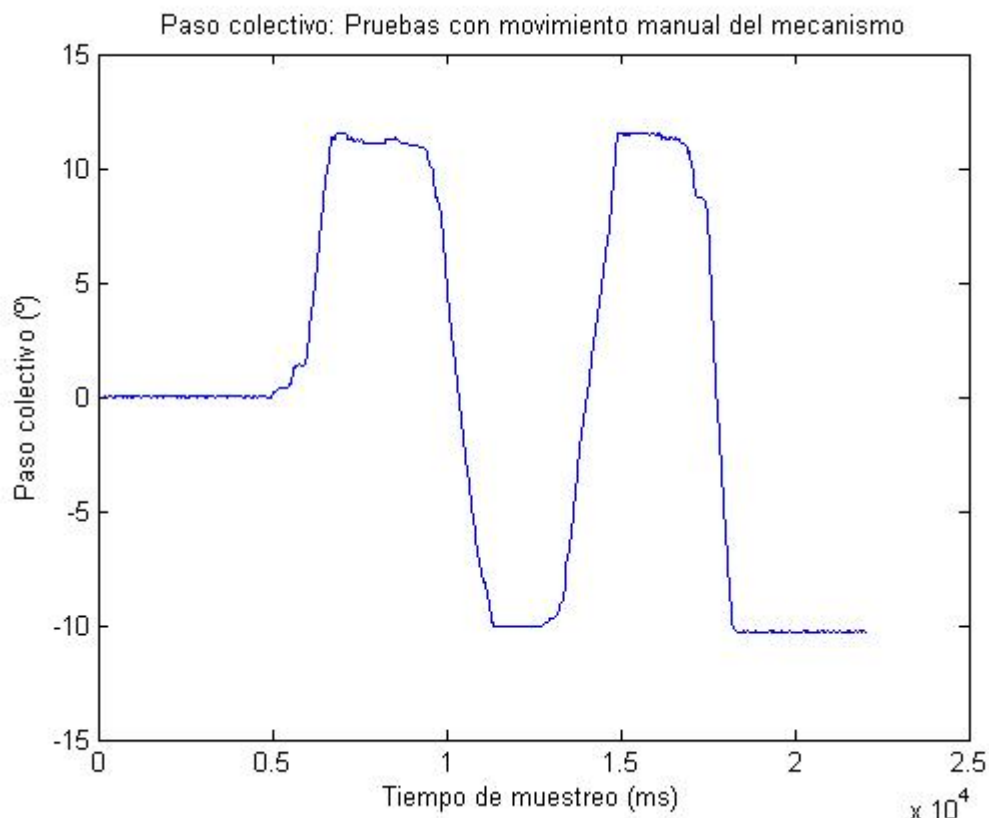


Figura 5.2: Paso medido en las pruebas con movimiento manual

En la gráfica mostrada en esta página se presentan los valores de las medidas de paso colectivo registrados por el programa informático *colecdis* en las pruebas realizadas con movimiento manual del mecanismo. Los resultados reflejan el inicio de la prueba con el paso a 0° , seguido de una serie de 4 barridos de todo el recorrido del mecanismo (desde aproximadamente 11° hasta aproximadamente -10°). El primer barrido sólo se realizó desde 0° hasta 11° . Finalmente se concluyó la prueba (se detuvo el programa) con el mecanismo situado en su posición de paso mínimo. El ruido registrado en las medidas se atribuye a: imprecisión del operador en el posicionamiento del mecanismo, imprecisiones propias del mecanismo, imprecisiones en el potenciómetro, e imprecisiones en la conversión de analógico a digital.

Para contabilizar con valores estadísticos la amplitud de la incertidumbre de las medidas se han empleado las funciones *mean* y *std* de MATLAB. Estas funciones calculan la media y la desviación típica de una muestra, respectivamente. Se han aplicado a los primeros 5 segundos de medidas. Concretamente se han aplicado a un vector con las 240 medidas (hasta el instante de muestreo 4970, incluido). Se ha elegido este conjunto de valores por ser intervalo en el que no se varía la posición del mecanismo de paso colectivo. Se puede aplicar este cálculo a cualquiera de los tramos de barrido aplicando una regresión lineal y calculando su dispersión. La *media* de la muestra es de 0.0131° . La *desviación típica* es de 0.0157° . La probabilidad, suponiendo distribución normal, de cometer un error en la medida de $\pm 0.1^\circ$ es inferior al 1% y se puede considerar estadísticamente imposible.

5.1.3 Pruebas con movimiento por control remoto del mecanismo

En estas pruebas realizamos unas medidas utilizando la caja de aviónica y el programa de gestión de adquisición de datos *colecddsk* que no calcula la derivada del ángulo de paso en cada instante. El objetivo de las pruebas es comprobar el funcionamiento, según los requisitos del proyecto, del conjunto sensor-servomecanismo.

Aunque en este procedimiento se describe la toma de medidas, en las pruebas realizadas **no se tomaron medidas con la caja de aviónica**. Las pruebas realizadas sirvieron para comprobar que el servo tiene suficiente potencia para mover el mecanismo con la carga adicional del sensor. También sirvieron para configurar el equipo de radiofrecuencia para realizar maniobras y operaciones utilizando los mandos de vuelo del helicóptero. Se consideran funcionalidades independientes la capacidad de adquisición de datos del sensor (demostrada en la **sección 5.1.2** de este texto) y la capacidad motora del servomecanismo con el sensor adosado.

En las pruebas con movimiento manual del mecanismo se comprobó el funcionamiento, según requisitos del proyecto, del programa informático de adquisición de datos. El resultado fundamental de estas pruebas fue un archivo de medidas de paso colectivo en formato *.txt*. Estas medidas debían reflejar el patrón de movimiento inducido manualmente en el mecanismo de paso colectivo. En las pruebas con movimiento por control remoto se pretende inducir el mismo patrón de movimiento al mecanismo colectivo que se indujo en las pruebas con movimiento manual. En este caso el movimiento lo realiza el servomecanismo, comandado por el equipo de radiofrecuencia cuyos mandos maneja el operador. El resultado de las pruebas es un archivo *.txt* de estructura idéntica al que se obtuvo en las pruebas con movimiento manual. El procedimiento para realizar la prueba se detalla a continuación:

- Requisito previo: El programa ejecutable *colecddsk.exe* debe haber sido cargado en la memoria flash de la placa *Hércules*.
- Requisito previo: El equipo de radiofrecuencia debe haber sido configurado. La emisora debe estar sintonizada con el receptor. El operador debe haber asignado a los mandos correspondientes (a elección del operador) los canales de radio independientes que controlan los movimientos de los cinco servomecanismos del helicóptero. En esta aplicación sólo se han asignado los siguientes canales:
 - Servomecanismo de la válvula de admisión del carburador.
 - Servomecanismo de paso colectivo.

No se ha programado mezcla de los mandos de ambos canales para tener control independiente de las dos variables (el paso colectivo y la velocidad de rotación del rotor principal) que miden los sensores instalados. No se han asignado los otros canales porque no se pretende volar el helicóptero en estas pruebas y no es necesario operar ni el paso cíclico (2 servomecanismos) ni el paso del rotor de cola (1 servomecanismo).

- 1) Conectar los servomecanismos de válvula de admisión y paso colectivo al receptor *DDS-10* en los canales que se hayan activado para la prueba. Alimentar el receptor. Encender la emisora y comprobar que reconoce al receptor y que la configuración de mandos es la deseada. Comprobar que los actuadores se mueven cuando los mandos son accionados.
- 2) Conectar el sensor al circuito de adquisición de la placa mediante el conector de 4 pines descrito en la **sección 4.4.2** de este texto. El potenciómetro recibe alimentación a través de este conector. Son necesarios un monitor y un teclado conectados a sus puertos periféricos correspondientes. La placa se alimenta mediante la fuente de tensión variable dedicada a dicha función. En el momento que recibe alimentación la placa entra en modo *arranque*.
- 3) Iniciar el sistema operativo *RTL Flash*. Se ejecuta el archivo */Home/padur/Enrique/colecdsk*. El archivo espera a que el usuario responda al mensaje de calibración del potenciómetro. Una vez calibrado el potenciómetro, el usuario pulsa *intro* y aparece en pantalla el menú principal de los programas de medidas, descrito en la **sección 4.3.2** de este texto.
- 4) Arrancar las medidas y aparecen en pantalla una sucesión de muestras tomadas en tiempo real con el valor del paso colectivo (grados) y una *time tag*, o marca del instante en el que se ha tomado la muestra (ms).
- 5) Realizar movimientos de rotación de las palas en torno a su eje de paso colectivo, con velocidad uniforme, realizando todo el recorrido entre los topes del mecanismo. Comprobar en pantalla la evolución de las muestras, coherente con el movimiento aplicado.
- 6) Mantener las palas fijas en un punto de paso de valor conocido. Comprobar que las muestras reflejan el mismo valor de paso colectivo.
- 7) Detener las medidas pulsando 'P'. El archivo de texto con todas las muestras, y con el mismo formato que se presentó en pantalla en tiempo real, se genera automáticamente en */Home/padur/Enrique*.

5.1.4 Pruebas del programa de cálculo de la derivada

En estas pruebas realizamos unas medidas utilizando la caja de aviónica y el programa de gestión de adquisición de datos *dcolecddsk* que calcula la derivada del ángulo de paso en cada instante. El objetivo de las pruebas era comprobar el funcionamiento, según los requisitos del proyecto, del programa de cálculo de la derivada del paso colectivo. En las pruebas con movimiento manual del mecanismo se comprobó el funcionamiento, según requisitos del proyecto, del programa informático de adquisición de datos. Estas medidas debían reflejar el patrón de movimiento inducido manualmente en el mecanismo de paso colectivo. En las pruebas con movimiento por control remoto se comprobó el funcionamiento, según requisitos del proyecto, del equipo de radiofrecuencia y del conjunto sensor-mecanismo en teleoperación del helicóptero. En estas pruebas la operación del mecanismo es la misma que en las descritas en la **sección 5.1.3**. El resultado de las pruebas es un archivo *.txt* de estructura similar al que se obtuvo en las pruebas con movimiento manual y en las pruebas con movimiento por control remoto. La diferencia radica en una columna adicional con el valor de la derivada calculada a partir del valor de paso de la muestra actual y el valor de paso de la muestra anterior. El procedimiento para realizar la prueba se detalla a continuación:

- Requisito previo: El programa ejecutable *dcolecddsk.exe* debe haber sido cargado en la memoria flash de la placa *Hércules*.
- Requisito previo: El equipo de radiofrecuencia debe haber sido configurado. La emisora debe estar sintonizada con el receptor. El operador debe haber asignado a los mandos correspondientes (a elección del operador) los canales de radio independientes que controlan los movimientos de los cinco servomecanismos del helicóptero. En esta aplicación sólo se han asignado los siguientes canales:
 - Servomecanismo de la válvula de admisión del carburador.
 - Servomecanismo de paso colectivo.

No se ha programado mezcla de los mandos de ambos canales para tener control independiente de las dos variables (el paso colectivo y la velocidad de rotación del rotor principal) que miden los sensores instalados. No se han asignado los otros canales porque no se pretende volar el helicóptero en estas pruebas y no es necesario operar ni el paso cíclico (2 servomecanismos) ni el paso del rotor de cola (1 servomecanismo).

- 1) Conectar los servomecanismos de válvula de admisión y paso colectivo al receptor *DDS-10* en los canales que se hayan activado para la prueba. Alimentar el receptor. Encender la emisora y comprobar que reconoce al receptor y que la configuración de mandos es la deseada. Comprobar que los actuadores se mueven cuando los mandos son accionados.

- 2) Conectar el sensor al circuito de adquisición de la placa mediante el conector de 4 pines descrito en la **sección 4.4.2**. El potenciómetro recibe alimentación a través de este conector. Son necesarios un monitor y un teclado conectados a sus puertos periféricos correspondientes. La placa se alimenta mediante la fuente de tensión variable dedicada a dicha función. En el momento que recibe alimentación la placa entra en modo *arranque*.
- 3) Iniciar el sistema operativo *RTL Flash*. Se ejecuta el archivo */Home/padur/Enrique/dcolecisk*. El archivo espera a que el usuario responda al mensaje de calibración del potenciómetro. Una vez calibrado el potenciómetro, el usuario pulsa *intro* y aparece en pantalla el menú principal de los programas de medidas, descrito en la **sección 4.3.2** de este texto.
- 4) Arrancar las medidas y aparecen en pantalla una sucesión de muestras tomadas en tiempo real con el valor del paso colectivo (grados), el valor de la derivada en grados/s (a partir de la segunda muestra), y una *time tag*, o marca del instante en el que se ha tomado la muestra (ms).
- 5) Realizar movimientos de rotación de las palas en torno a su eje de paso colectivo, con velocidad uniforme, realizando todo el recorrido entre los topes del mecanismo. Comprobar en pantalla la evolución de las muestras, coherente con el movimiento aplicado.
- 6) Detener las medidas pulsando 'P'. El archivo de texto con todas las muestras, y con el mismo formato que se presentó en pantalla en tiempo real, se genera automáticamente en */Home/padur/Enrique*.

Resultados

En la página siguiente se muestran los resultados de la prueba en una gráfica de paso colectivo (°) frente a instante de muestra (ms) y de la derivada de paso colectivo (°/s) frente a instante de muestra (ms). En azul y con ejes en el lado izquierdo se muestra el paso colectivo, y en verde y con ejes en el lado derecho se muestra su derivada. Se puede observar una mayor dispersión de datos en los valores de la derivada. Esto se debe a que una pequeña desviación en un valor del paso colectivo se divide por un número entero que oscila entre 19, 20 y 21 (intervalo entre dos muestras en ms), y se multiplica por 1000 para obtener unidades de °/s. La resultante es una amplificación de aproximadamente 500 veces. De aquí se deduce una mayor desviación del dato de la derivada asociado a un par de valores de paso colectivo. Para más detalles sobre la fórmula de la derivada consultar la **sección 4.3.4** de este texto.

Por otro lado, se puede observar cómo la derivada presenta picos positivos y negativos que corresponden a cambios bruscos en el paso colectivo (observar la gráfica en los instantes de muestreo aproximados siguientes: 5500 ms, 11000 ms, 14000 ms, 17000 ms). También se observa que la derivada es nula cuando el paso colectivo no varía, como cabe esperar (observar el intervalo de muestreo comprendido entre 12000 y 14000 ms y el comprendido entre 14500 y 16000 ms).

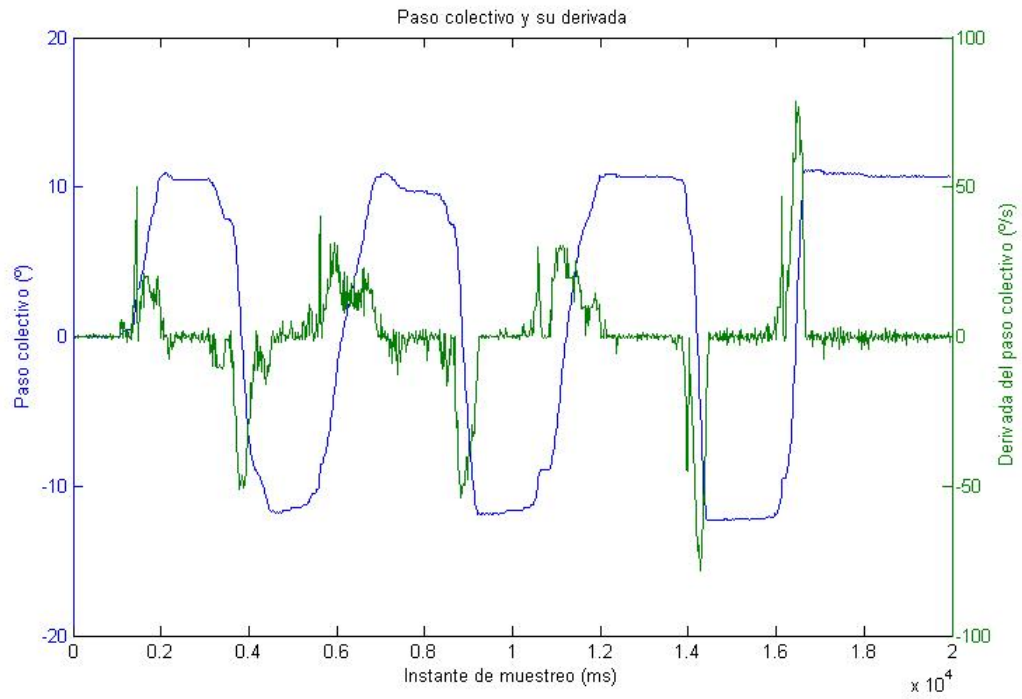


Figura 5.3: Paso colectivo y derivada obtenidos en las pruebas con cálculo de derivada

5.2 Pruebas del sistema sensor de velocidad angular

El sensor de velocidad angular fue sometido a dos bloques de pruebas fundamentales. En unas pruebas previas a estos dos bloques denominadas *pruebas de caracterización* comprobamos el funcionamiento correcto del conjunto de sensor y *Throttle Jockey*. Utilizamos un dispositivo de velocidad de giro conocida, un ventilador de refrigeración de un PC, para determinar si la medida que proporcionaba el sensor era correcta. Para representar el pulso que genera el *Throttle Jockey* (descripción detallada en la **sección 3.1.4** de este texto) y medir su ancho empleamos un osciloscopio. El ancho del pulso en unidades de tiempo es el periodo de rotación del dispositivo cuya velocidad de giro se está midiendo. Para estas pruebas no se empleó el programa informático que realiza la adquisición de datos.

En el primer bloque de pruebas comprobamos el funcionamiento correcto del sensor óptico embarcado en un helicóptero de radiocontrol. La plataforma empleada fue un helicóptero de motor eléctrico y menores dimensiones que el *Raptor*, con el objetivo de realizar las pruebas de una forma segura en el interior del laboratorio. Se realizó un barrido de todo el recorrido de la palanca de gases del helicóptero y se comprobó que el sensor óptico era capaz de proporcionar medidas correctas de la velocidad de giro del rotor. El patrón de verificación de dichas medidas fue un tacómetro portátil de efecto estroboscópico descrito en la **sección 3.1** de este texto.

En el segundo bloque de pruebas comprobamos el funcionamiento correcto del sistema de adquisición de datos utilizando la caja de aviónica y el programa *opticsk.exe*, conectando la salida del *Throttle Jockey* al circuito digital de adquisición de datos de la placa *Hércules*. Para verificar el funcionamiento correcto del circuito y del programa informático volvimos a realizar medidas sobre el ventilador de refrigeración de PC empleado en las pruebas de caracterización. En el segundo bloque de pruebas se comprobó que el programa informático proporciona datos fidedignos de la velocidad de giro medida en cualquier eje de rotación.

5.2.1 Pruebas de caracterización

En estas pruebas realizamos medidas de la velocidad de giro de un ventilador de refrigeración de PC. Para visualizar el pulso medido utilizamos un osciloscopio modelo *Hameg HM 407 2.01*. El objetivo fundamental de estas pruebas fue verificar que el *Throttle Jockey* proporcionaba la señal esperada (características de la señal en la **sección 3.1.4** de este texto). La velocidad del ventilador es conocida (velocidad nominal del fabricante) y de 2700 r.p.m. con alimentación nominal de 12 V. Si el funcionamiento del conjunto de sensor y *Throttle Jockey* es correcto, midiendo el ancho del pulso en el visor del osciloscopio se determina directamente el periodo de rotación del ventilador, y realizando una simple operación matemática se determina la velocidad de rotación en unidades de revoluciones por minuto. El funcionamiento se considera correcto si el resultado de la medida es una velocidad de aproximadamente 2700 r.p.m.

El procedimiento para el cumplimiento del objetivo de la prueba se detalla a continuación:

- 1) Conectar el sensor, receptor y *Throttle Jockey* según especificado en la **sección 3.1.3**.
- 2) Alimentar el receptor con tensión continua de entre 3.5V y 8V. En la prueba se alimentó a 5V.
- 3) Conectar la sonda del osciloscopio al cable de señal que sale del *Throttle Jockey* al servo. No es necesario tener un servo conectado a dicho cable en esta prueba. El cable de señal es blanco/naranja según el fabricante (referir a **sección 3.4.2**).
- 4) Adherir la tira reflectante sobre la cara plana del eje del ventilador como se indica en la **sección 3.4** de este texto. Colocar el sensor frente al ventilador según se especifica en la **sección 3.4.1** de este texto. En esta prueba se utilizaron tacos de madera y cinta adhesiva para colocar el sensor en la posición idónea. El ventilador se situó en posición vertical.
- 5) Alimentar el ventilador con 12 V de tensión continua para ponerlo en movimiento a su velocidad de giro nominal.
- 6) Medir el ancho del pulso (distancia entre dos bajadas consecutivas) mostrado en el visor del osciloscopio en unidades de tiempo. El valor obtenido es el periodo de rotación, ya que cada bajada indica la aparición frente al haz del sensor del principio de la tira reflectante. Para justificación referirse a la **sección 3.1.4** de este texto.
- 7) Convertir dicho periodo de rotación a velocidad de giro en r.p.m. y comparar con velocidad nominal del ventilador.

5.2.2 Pruebas de validación del sensor óptico

En estas pruebas realizamos medidas de la velocidad de giro del rotor principal de un helicóptero de control remoto de motor eléctrico. No utilizamos la caja de aviónica. Se observó el pulso de salida en un osciloscopio y se midió el ancho de pulso (periodo de rotación del eje del rotor) sobre el visor del osciloscopio. Se realizó un barrido para todo el recorrido de la palanca de gases de los mandos del helicóptero. Se empleó un tacómetro de efecto estroboscópico para comprobar que la medida proporcionada por el sensor óptico era correcta. En estas pruebas, el objetivo fundamental fue verificar que las medidas que proporciona el sensor óptico son correctas para el rango de operación al que se verá sometido en su implementación objetivo a bordo del *Raptor*. A diferencia de las pruebas de caracterización, en estas pruebas conocíamos la señal que proporcionaba el *Throttle Jockey* y queríamos comprobar que el sistema completo del sensor óptico proporcionaba medidas fiables de la velocidad de giro de un eje rotatorio cualquiera. A continuación se describe el material necesario para realizar la prueba y el procedimiento empleado.

- 1) Realizar conexiones entre *Throttle Jockey*, sensor óptico y osciloscopio de forma idéntica a las realizadas en las pruebas de caracterización de la **sección 5.2.1**.
- 2) Fijar el sensor óptico al fuselaje del helicóptero de forma que el haz del sensor incida sobre la cara plana del engranaje del rotor principal. Fijar el trozo de tira reflectante de tamaño adecuado (en caso de duda consultar **sección 3.4** y **sección 3.4.1**) en dicho engranaje para que el conjunto de sensor y tira reflectante quede dispuesto de forma similar a la que se describe en la **sección 3.4.1**.
- 3) El helicóptero se mantiene en tierra mediante una plataforma que le impide realizar desplazamientos de su centro de gravedad. También le debe impedir giros en torno a sus ejes de rotación superiores a un determinado ángulo, ya que una libertad total de giro podría dañar las conexiones entre sensor óptico y *Throttle Jockey*. La plataforma descrita en la **sección 2.2** ó una de características similares es adecuada para esta prueba. En la prueba realizada empleamos una plataforma similar emplazada en el laboratorio de Ingeniería Aeroespacial de la E.S.I.
- 4) En la prueba realizada disponíamos de una emisora de radiofrecuencia sintonizada con la receptora del helicóptero. Esta emisora nos permitía controlar los actuadores del helicóptero.
- 5) Realizar un barrido a distintas velocidades de giro. Para cada velocidad de giro estable, congelar el pulso visualizado en el osciloscopio y medir el ancho para determinar el periodo de la rotación. Simultáneamente, un segundo operador debe medir la velocidad de giro con el tacómetro estroboscópico. Para obtener dicha medida, se colocaron una tiras de papel blanco con propiedades reflectantes en los planos superiores de las palas del rotor principal que facilitara la lectura del tacómetro. Teniendo en cuenta la multiplicidad que puede tener la lectura respecto de la velocidad de giro real, esta medida debe coincidir con la obtenida a partir del pulso del osciloscopio.

Resultados

A continuación se presenta una gráfica con medidas tomadas durante la prueba, con el tacómetro y el sensor óptico, de forma simultánea e independiente. Se puede observar la similitud de los datos registrados por ambos aparatos. El procedimiento utilizado durante la prueba consistió en obtener un régimen estable de rotación del helicóptero y tomar ambas medidas. Esto se pudo realizar con 7 regímenes distintos, pero no igualmente espaciados en el valor de las revoluciones. Este hecho se refleja en la gráfica. Se presentan debajo de la gráfica los conjuntos de valores medidos con los que se ha representado en rpm.

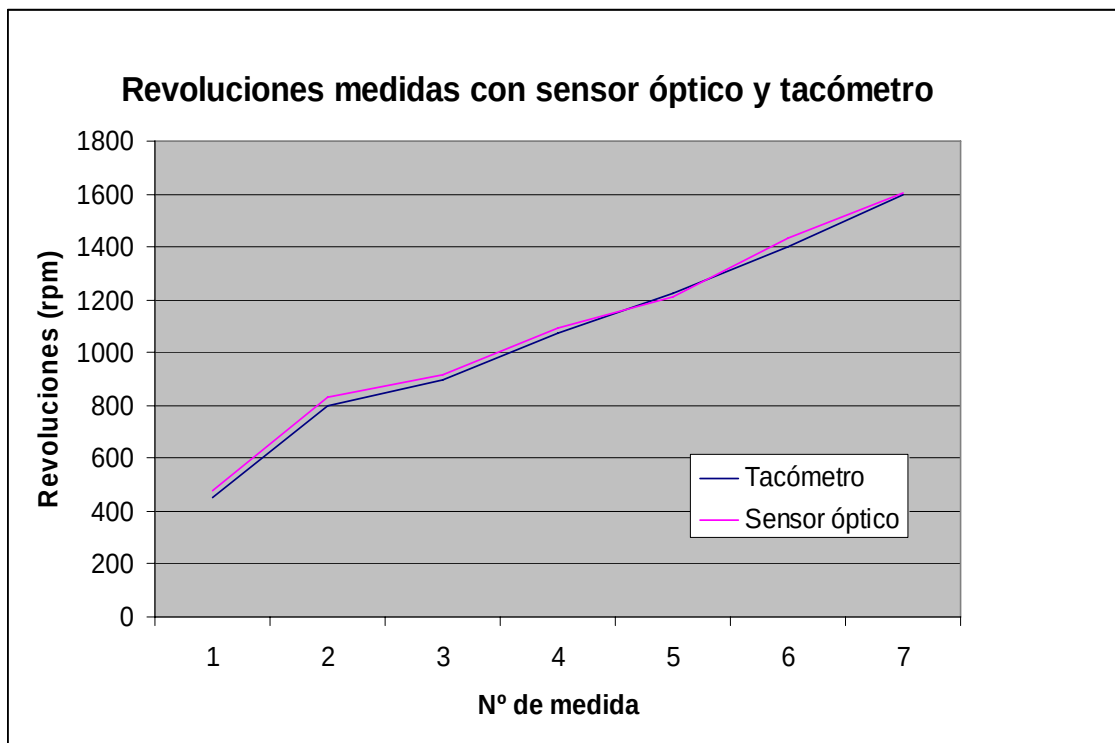


Figura 5.4: Medidas de r.p.m. en las pruebas del sensor óptico

Tacómetro	Sensor Óptico
450	475.8
800	834
900	918
1075	1092
1225	1212
1400	1434
1600	1602

5.2.3 Pruebas de validación del programa informático

En estas pruebas realizamos unas medidas utilizando la caja de aviónica y el programa de gestión de adquisición de datos *opticdsk* que calcula la velocidad de giro del eje del rotor principal en cada instante de muestreo. El objetivo de las pruebas era comprobar el funcionamiento, según los requisitos del proyecto, del programa de cálculo de la velocidad de giro del eje del rotor principal. En las pruebas de validación del sensor óptico se comprobó que el conjunto del sensor y el *Throttle Jockey* proporcionaba medidas correctas de la velocidad de giro de un eje de rotor principal de un helicóptero para el intervalo de velocidades al que se tendrán que enfrentar en los experimentos con el *Raptor*. En las pruebas de validación del programa informático se realizan medidas sobre la misma plataforma de ensayo que se empleó en las pruebas de caracterización del sensor óptico (**sección 5.2.1**). Se consideró innecesario realizar un barrido sobre el eje de un helicóptero para verificar el correcto funcionamiento del programa *opticdsk*. Se consideró suficiente reproducir la prueba de caracterización y obtener el valor esperado de r.p.m. (2700 r.p.m. nominales del ventilador) en el programa de cálculo. El resultado de las pruebas es un archivo *.txt* de estructura similar al que se obtuvo en las pruebas realizadas sobre el sensor de paso colectivo descritas en las **secciones 5.1.2 y 5.1.3** de este texto. El procedimiento para realizar la prueba se detalla a continuación:

- Requisito previo: El programa ejecutable *opticdsk.exe* debe haber sido cargado en la memoria flash de la placa *Hércules*.
- 1) Realizar conexiones entre receptor *DDS-10*, *Throttle Jockey* y sensor óptico de forma idéntica a las realizadas en las pruebas de caracterización de la **sección 5.2.1**. En esta prueba no es necesario conectar las sondas del osciloscopio al circuito. Ejecutar **apartados 2), 4) y 5)** de la prueba de caracterización descrita en la **sección 5.2.1**.
- 2) La salida del *Throttle Jockey* al servo debe conectarse al conector de entrada al circuito de adquisición de datos digitales de la placa *Hércules*. Este conector está descrito en la **sección 3.4.2** de este texto. Son necesarios un monitor y un teclado conectados a sus puertos periféricos correspondientes. La placa se alimenta mediante la fuente de tensión variable dedicada a dicha función. En el momento que recibe alimentación la placa entra en modo *arranque*.
- 3) Iniciar el sistema operativo *RTL Flash*. Se ejecuta el archivo */Home/padur/Enrique/opticdsk*. Aparece en pantalla el menú principal de los programas de medidas, descrito en la **sección 3.3.2** de este texto.
- 4) Arrancar las medidas y aparecen en pantalla una sucesión de muestras tomadas en tiempo real con el valor de la velocidad de giro (r.p.m.) y una *time tag*, o marca del instante en el que se ha tomado la muestra (ms).
- 5) Detener las medidas pulsando 'P'. El archivo de texto con todas las muestras, y con el mismo formato que se presentó en pantalla en tiempo real, se genera automáticamente en */Home/padur/Enrique*.

Resultados

A continuación se muestran dos gráficas de los resultados obtenidos en las pruebas de validación del programa informático. En ambas se muestran las medidas de rpm tomadas durante el experimento. La primera gráfica tiene una escala en el eje de las revoluciones de 0 a 5.000 rpm. La segunda gráfica tiene una escala reducida para ver el detalle de la variabilidad de las medidas. El ventilador cuya velocidad de giro se mide tiene una velocidad nominal de 2.700 rpm.

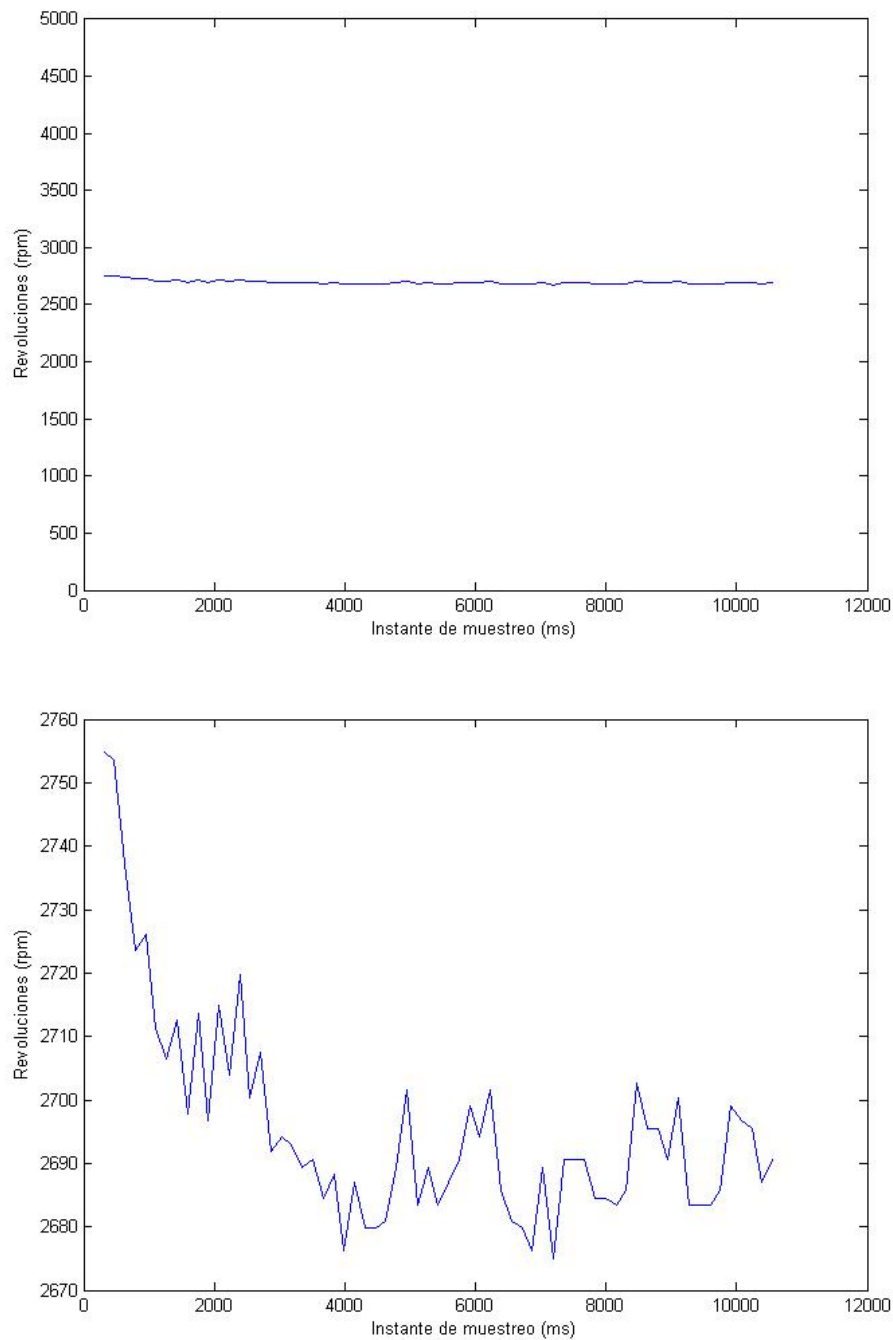


Figura 5.5: Medidas de r.p.m. en las pruebas del circuito de adquisición de datos