

4.- DETERMINACIÓN EXPERIMENTAL DE LA VELOCIDAD DE GIRO DEL VOLANTE.

4.1.- INTRODUCCION

4.2.- MEDIDA DE LA VELOCIDAD ANGULAR

4.3.- DESCRIPCION DEL MONTAGE MECANICO

4.4.- FORMA Y ANALISIS DE LOS DATOS OBTENIDOS

4.1.- INTRODUCCION

Con el objetivo de ser capaces de conocer el par y potencia instantáneos que nos está entregando un motor, y empleando como elemento resistivo del mismo un volante con elevada inercia, se nos plantea la cuestión práctica de cómo llegar a obtener unos datos lo suficientemente fiables como para poder confiar en la utilidad de nuestro banco de ensayos.

Las sencillas ecuaciones de la dinámica nos permiten relacionar los datos que queremos obtener, esto es, el par y la potencia que nos está entregando el motor instantáneamente, con variables cinemáticas más fácilmente medibles como son la aceleración o velocidades angulares.

$$PAR \Rightarrow M = I \cdot \alpha = I \cdot \frac{d\omega}{dt} \approx I \cdot \frac{\Delta\omega}{\Delta t} \quad \mathbf{4.1}$$

$$POTENCIA \Rightarrow P = M \cdot \omega \quad \mathbf{4.2}$$

Tal y como se muestran en las ecuaciones, fijado el valor de la relación de transmisión del banco de ensayos, y una vez conocido el valor de la inercia del volante, la evolución de la velocidad angular con el tiempo nos permite estimar el valor del par y de la potencia del motor. Cuanto menor sea el intervalo de tiempo entre los que somos capaces de obtener datos sobre la velocidad, mas precisión y veraces serán nuestros datos.

4.2.- MEDIDA DE LA VELOCIDAD ANGULAR

Para la medida de la velocidad angular, el dispositivo que tradicionalmente se ha empleado ha sido el tacómetro. Según ha progresado la técnica, los tacómetros han ido evolucionando aplicando diferentes soluciones para la medida de la velocidad angular. Si bien los primeros diseños de los mismos se trataban de dispositivos mecánicos, como por ejemplo el mecanismo de Watt, que basaba su funcionamiento en el aumento de la velocidad centrífuga con la velocidad, con el desarrollo de la electricidad y el magnetismo se dio paso al empleo de los tacómetros magnéticos, aun de ampliada utilización en la actualidad.

Estos basan su funcionamiento en la conversión velocidad de rotación a magnitud eléctrica, gracias al empleo de imanes permanentes que inducen en bobinas fijas tensiones proporcionales a la velocidad de rotación. La lectura de esta tensión se traduce en velocidades angulares correspondientes.

La evolución de la electrónica dio paso al desarrollo de tacómetros electrónicos, siendo estos los dispositivos más modernos y empleados en la actualidad. Su principio básico de funcionamiento es la medida de la frecuencia de la señal de pulsos producida por un generador de impulsos asociado al elemento giratorio. La frecuencia será proporcional a la velocidad de giro o bien a la precisión del dispositivo.

Para la generación de los pulsos se emplean diferentes soluciones, como por ejemplo los encoders incrementales o absolutos, que emplean pulsos de luz producidos al hacer pasar un haz de luz por un disco en el que se han practicado diferentes marcas. Diferentes formas de generar y registrar el pulso eléctrico dan lugar a diferentes tipos de tacómetros electrónicos, pero todos comparten un mismo principio de funcionamiento: el recuento de la frecuencia o distancia entre los trenes de pulsos generados.

4.2.1.- Montaje y procedimiento para la medida de la velocidad.

Con la idea intentar aprovechar al máximo los recursos disponibles, aunque desconociendo a priori la bondad de su funcionamiento, se optó por la medición de la velocidad angular del volante mediante el cómputo de impulsos eléctricos, principio de funcionamiento análogo al del cuentakilómetros de una bicicleta.

Un circuito eléctrico que cuenta con un interruptor magneto-mecánico, genera un pulso eléctrico cuando un pequeño imán colocado sobre el perímetro del volante, perturba en cada rotación, el área en el que éste se sitúa. Estos pulsos eléctricos son registrados y procesados en un ordenador, para lo que se necesita una tarjeta de adquisición de datos que haga de interface. Los pulsos, o variaciones más o menos instantáneas de voltaje son interpretados posteriormente para obtener la información requerida. Puesto que conocemos el intervalo angular entre cada pulso eléctrico, la cercanía o lejanía de los mismos en el tiempo es un indicador de la velocidad a la que está rodando el volante.

El objetivo final es el de obtener una curva de evolución de la velocidad lo suficientemente suave y fiel a la realidad como para que pueda considerarse válida. Se desprenden una serie de requerimientos de todos los elementos que intervienen en su medida:

- La captación de la señal debe garantizarse en todo el rango de funcionamiento del motor. Si tomamos como velocidad de giro máxima del mismo un régimen de 12000 rpm, y contando con la relación global de transmisión del banco $R_v = 0,2$, el volante podría llegar a girar a unas 2400 rpm.
- El sensor que detecta los pulsos magnéticos debe garantizar el anterior rango de funcionamiento. Por lo tanto, la frecuencia que se ha de garantizar es de:

$$f_{sens} (hz) > \frac{2600 \cdot n^{\circ}_{imanes}}{60}$$

Para un solo imán, la frecuencia de funcionamiento del sensor debe ser superior a 44hz. A mayor numero de imanes, mayor precisión en los datos se tendrá, pues se reduce el tiempo que transcurre entre señales, siempre que el sensor sea capaz de medirlos. Se colocarán el máximo número de imanes que el montaje permita sin que se alcancen el límite de saturación de los elementos.

- La frecuencia de adquisición de los datos ha de ser tal que su valor no perturbe la propia medida de estos (*efecto Nyquist*). Para ello la frecuencia de adquisición se recomienda ser dos veces superior a la máxima frecuencia de la señal que se pretende medir, esto es:

$$f_{adq} (hz) > 2 \cdot f_{sens} = \frac{2600 \cdot n^{\circ}_{imanes}}{30}$$

Para un solo imán tenemos que esta a de ser superior a 87hz. Los sucesivos ensayos se han realizado a una frecuencia no inferior a 500hz, con lo que nos aseguramos de superar generosamente a la frecuencia de Nyquist.

4.2.2.- Descripción de los elementos empleados

LA TARJETA DE ADQUISICION DE DATOS

La tarjeta de adquisición de datos empleada para adquirir las señales ha sido una LabJack U3. Esta sencilla tarjeta permite entradas y salidas analógicas y digitales, a la vez que cuenta a su vez con dos salidas de voltaje a 5 Vc, empleados como voltajes de referencia para los pulsos.



Fig. 4.1 – Imagen de la Tarjeta de Adquisición de datos empleada.

Para la generación de los pulsos se empleo un sencillo circuito que conecta los terminales de voltaje de referencia de +5V, con el terminal de entrada, interponiendo entre ambos un interruptor que al ser excitado, genera los pulsos eléctricos al voltaje de referencia.

SENSORES O DETECTORES DE CAMPO MAGNETICO.

Como elemento excitador del sistema de medida se han empleado uno o varios imanes distribuidos en el perímetro del volante. Estos permiten que algún sensor o receptor detecte la variación del campo magnético a su paso, generando una señal eléctrica.

El empleo de varios imanes permite mayor precisión en los datos, aunque requiere una distribución equidistante precisa para no obtener resultados oscilatorios en cada ciclo. Además la frecuencia de excitación se multiplica, debiéndose tener cuidado de no alcanzar la máxima frecuencia de funcionamiento del sensor.

Dada la alta frecuencia a la que gira el volante, y tal como sucesivas pruebas confirmaron, el empleo de un solo imán se mostró suficiente para la obtención de unos resultados aceptables, sin saturar los elementos de medida.

Los elementos más sencillos que permiten la detección de la presencia de un campo magnético son los denominados interruptores o válvulas *reed*. Bajo la acción de un campo magnético de cierta intensidad, estos elementos mecánicos normalmente encapsulado en un pequeño vidrio en el que se hace vacío, permiten la apertura y cierre del circuito eléctrico en el que se dispongan. Al aproximar un campo magnético, la pletina metálica en su interior se dobla haciendo contacto entre los dos bornes del sensor y cerrando el circuito

Los más sencillos, y el primero que se utilizó en los primeros montajes de prueba, son los que se emplean en los cuentakilómetros de las bicicletas. Aunque diseñados para trabajar a menores revoluciones, este primer sensor permitió una puesta a punto previa del sistema.

Cuando se emplearon con mayores velocidades de giro con el fin de probar el sistema a los regímenes previstos de funcionamiento, se apreció la falta de sensibilidad de los mismos, requiriéndose grandes variaciones en la velocidad del volante para que se detectaran cambios en la salida de la velocidad. Para estos ensayos, en los que la velocidad a medir es del orden a la que se tendría con el motor real, se empleo una válvula reed de mayor frecuencia máxima de funcionamiento.



Fig. 4.2 – Imagen del interruptor REED como el empleado para la generación de pulsos.

En la actualidad, para aplicaciones que requieren frecuencias de funcionamiento incluso más altas, o mayor precisión en las medidas, se emplean los denominados *sensores de efecto hall*. Se trata de unos componentes electrónicos que generan un pulso eléctrico cuando detectan una variación del campo magnético por encima de cierto nivel. En este caso la apertura o cierre del circuito la realiza un componente electrónico, no un contacto eléctrico, generándose una señal de salida mucho más limpia y precisa.

Aunque finalmente no se emplearon este tipo de sensores, puesto que la precisión requerida, y los regímenes de giro no eran excesivos, sin duda un aumento de estos requeriría del empleo de un sensor de este tipo para obtener resultados lo suficientemente fiables.

Un sensor que sí se probó como forma alternativa medir la velocidad fueron los propios sensores MTI. Estos, aparte de integrar sendos acelerómetros, también cuentan con un detector del campo magnético para orientarse con respecto al campo magnético terrestre. Al acercarse a estos un imán, se detecta la perturbación del campo magnético, pudiéndose ésta registrarse y procesarse para obtener la velocidad. El problema que presentan estos sensores es que la forma de la curva que mide su nivel varía al cambiar la frecuencia de giro, al depender esta del tiempo de paso del imán en la proximidad del sensor. Para regímenes de giro elevados, la elevada velocidad del imán hizo difícil el registro de una nítida variación del campo magnético.



Fig. 4.3 – Sensor de efecto HALL

SOFTWARE EMPLEADO PARA LA MEDIDA Y POSPROCESADO DE LOS DATOS.

Los datos de variación de voltaje y del tiempo son registrados a la frecuencia de adquisición de los datos a través de un software que comunica la tarjeta de adquisición con el PC. Este software registra en un fichero de texto el estado de todas las entradas, analógicas o digitales en tiempo real, mostrándose también los datos de entrada gráficamente.

Posteriormente, se ha empleado el software Matlab® para el análisis de estos archivos de texto, y el postprocesado de los datos en forma de pulsos a las correspondientes gráficas de velocidad-potencia-tiempo.

4.3.- DESCRIPCION DEL MONTAGE MECÁNICO

Para los diferentes ensayos de velocidad que se realizaron se ha empleado la misma estructura portante ya prevista para el banco de ensayos, a se le han agregado o eliminado ciertos elementos según su necesidad.

Tanto para la puesta a punto del sistema de adquisición de datos como para el posterior equilibrado del volante, se ha necesitado de un sistema que permitiera hacer girar el volante instalado en la estructura portante del banco. Algunas de las características necesarias fueron:

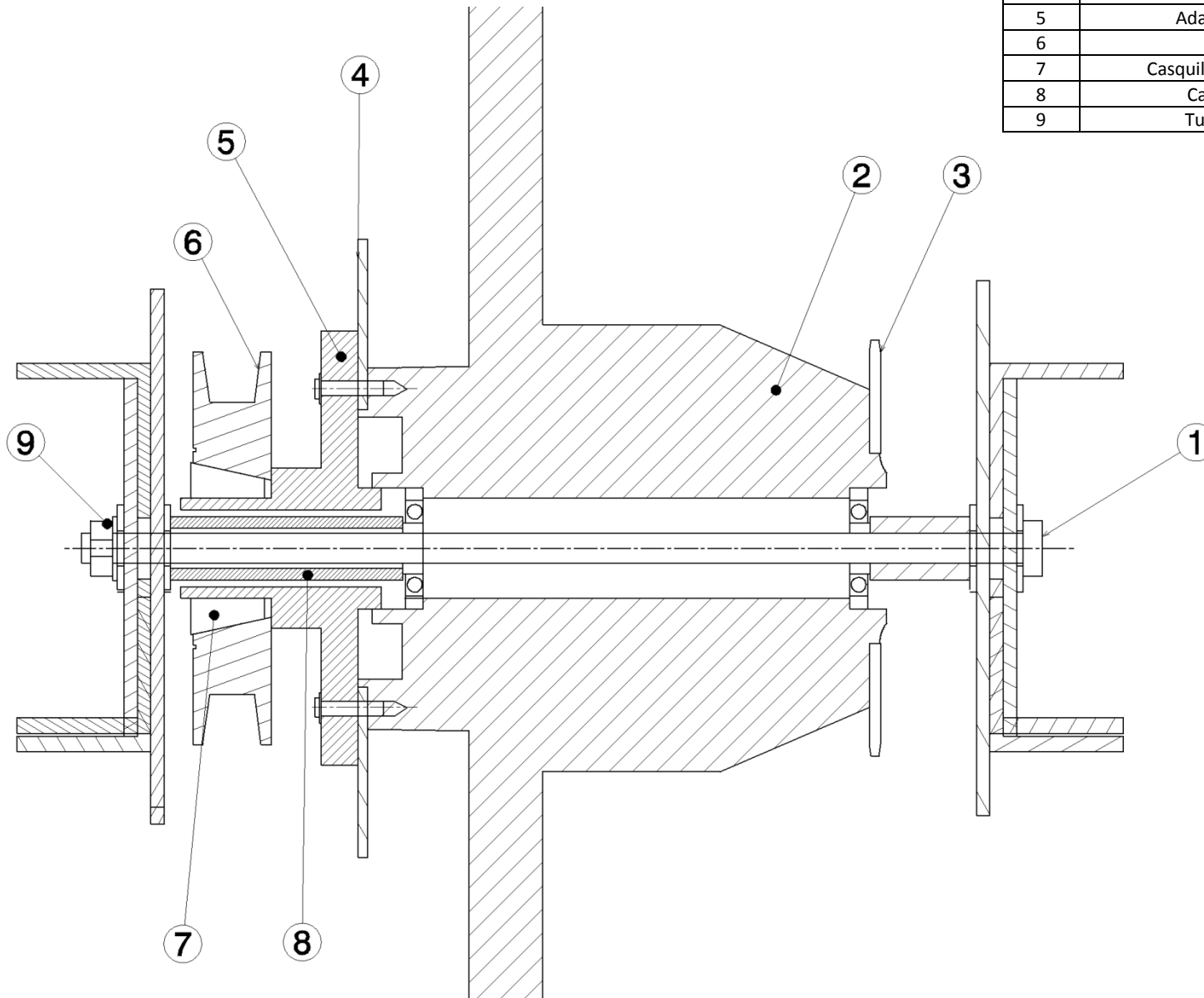
- Ha de poder hacer girar al rotor a diferentes niveles constantes y conocidos de velocidad.
- Debe tener la potencia suficiente para permitir hacer girar al rotor en un rango de funcionamiento preferentemente similar al que tendría el volante en unas condiciones reales de funcionamiento. De esta forma podemos comprobar el comportamiento de la estructura en unas condiciones similares a las reales.
- Ha de introducir un bajo nivel de vibraciones, para poder aislar aquellas que provienen del propio desequilibrado del rotor.

Para satisfacer estas necesidades, se ha empleado un motor eléctrico trifásico con un variador de frecuencia proveniente de un banco de ensayo de rodamientos. Los diferentes elementos como la correa, las poleas o los casquillos de ajustes cónicos se han podido aprovechar directamente del mismo, si bien fueron necesarias algunas modificaciones de la estructura original del banco.



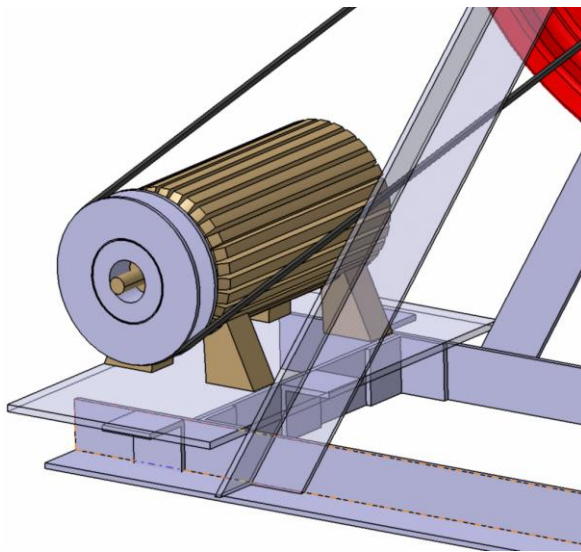
Fig.4.4.- Se muestra el montaje específico para la puesta a punto de sistema de adquisición de datos, y el equilibrado del rotor. Tanto el motor eléctrico, como ambas poleas, la correa y el tensor de la misma provienen de un banco de ensayos de rodamiento, y se han adaptado a la estructura portante del banco.

ESQUEMA DE LA SECCION TRANSVERSAL DEL EJE TRASERO



ITEM	DESCRIPCION
1	Eje pasante
2	Cuerpo de la rueda o volante de inercia
3	Piñon
4	Disco de freno
5	Adaptador de polea
6	Polea
7	Casquillo de apriete cónico
8	Casquillo interior
9	Tuerca de apriete

Dada la longitud fija de la correa, el motor eléctrico se situó en la parte trasera del banco. Aprovechando la longitud sobrante de los largueros se creó un pequeño soporte para el mismo empleando para su fijación el mismo concepto que para el resto de estructura, esto es,



aprovechando los angulares obtenidos del propio perfil de la estructura principal.

Su posición longitudinal se adaptó para permitir al tensor un correcto ajuste de la tensión de la correa.

Fig.4.5.- Representación CAD esquemática de la situación del motor eléctrico en la estructura del banco de ensayos.

El elemento que más complicó la adaptación del montaje fue el acoplamiento entre una de las poleas y el volante de inercia. Como se muestra en el esquema de la sección del eje trasero, las poleas se fijan al elemento eje mediante un casquillo cónico que se ajusta sobre el mismo al desplazarse relativamente con respecto a la polea. Un adaptador de aluminio torneado específicamente, hizo de elemento interface entre la polea y el rotor. Este a su vez debía permitir el paso del eje de fijación del conjunto y de un casquillo interior que permite el apriete del conjunto sobre la pista interior de los rodamientos del rotor.

Especial precaución se tuvo que tener al torneado las dimensiones de los diámetros del adaptador para producir un buen ajuste con el casquillo cónico, para posicionarse centrado con respecto a la rueda, y así evitar roces con el casquillo interno aun produciéndose pequeños movimientos vibratorios del volante.

Para el centrado del mismo sobre el volante se aprovechó la situación del hueco donde se posiciona el rodamiento, mientras que para su fijación se hizo uso de los taladros de fijación del disco de freno, que sirvió también de apoyo del mismo.

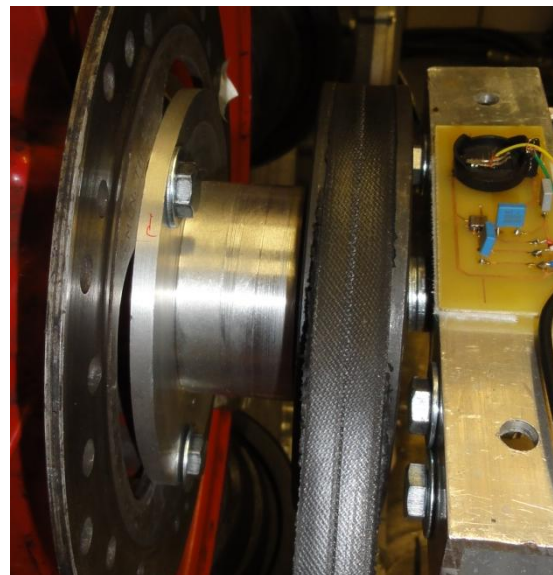


Fig.4.6.- Imagen del adaptador en su situación final sobre el banco. Su ancho se ajustó para alinear la correa con el motor situado en la parte trasera, aun guardando cierto margen lateral con la estructura.

4.4.- FORMA Y ANALISIS DE LOS DATOS OBTENIDOS.

4.4.1.- MEDIDA DE LA VELOCIDAD CONSTANTE

Con el objeto de poner a punto el sistema de adquisición de datos se llevaron a cabo una serie de ensayos tanto a velocidad constante y conocida, como en aceleración-deceleración hasta niveles de velocidad conocidos. Para ello, se empleo un volante con poca inercia que permitió cambios más instantáneos de la misma, así como probar las velocidades máximas mesurables por el sistema.

El objetivo de estos ensayos fue probar que el montaje se adaptaba a los diferentes perfiles de velocidad que podrían presentarse en un ensayo con un motor real y que a priori son desconocidos.

Para verificar la validez de los resultados obtenidos, nos basamos en la comprobación de los datos a diferentes niveles de velocidad constante, únicos que podían medirse con certeza con los medios disponibles. Para ello se emplearon diferentes herramientas de medida que permitieron contrastar entre sí, y validar los datos obtenidos.

- En primer lugar, la principal y más fiable fuente de información fue el **tacómetro digital**. Este sencillo dispositivo permite la medida de la frecuencia de paso de un elemento fotorefectante, a través de la incidencia sobre el mismo de un laser. La frecuencia instantánea en revoluciones por minuto es directamente mostrada en un pequeño display, con lo que es muy sencillo comprobar cuando se ha llegado a un nivel constante de velocidad.

Es suficiente con acercar el tacómetro a cierta distancia del elemento reflectante para se produzca una inmediata lectura de la velocidad de giro.



Fig. 4.7 – Ejemplo de tacómetro digital similar al empleado.

Al realizar una medida de forma externa al sistema, sin depender del registro de ningún sensor, fue el elemento que permitió la verificación de la medida in situ, para la posterior validación del resto de los datos.

- En segundo lugar, se empleó la información en frecuencia proporcionada por la propia señal del sensor reed. Un análisis en frecuencia de esta señal, proporciona la frecuencia básica y los múltiplos, del tren de pulsos proporcionado por el sensor. Al tratarse de un tren de ondas periódicas, el contenido en frecuencia de la señal registrada, nos proporciona la frecuencia de giro del volante.
- Como tercer elemento auxiliar, que permitió contrastar los resultados anteriores, fue el empleo de un acelerómetro acoplado a la estructura del banco. Aunque el objetivo principal del mismo no era la medida de la velocidad, sino como se verá en el próximo capítulo, el equilibrado del volante, al permitir el registro de las

aceleraciones introducidas a la estructura se estaba al mismo tiempo registrando la velocidad, pues la frecuencia de las vibraciones introducidas se corresponden con la frecuencia de giro. Un análisis en frecuencia de esta señal permite pues conocer la medida de la velocidad angular.

El empleo de este elemento permitió retroalimentar la validez tanto del sistema de medida de la velocidad, como del propio acelerómetro que se emplearía a posteriori. Los datos de ambos eran recogidos por la tarjeta de adquisición en el mismo fichero de texto.

Se muestran a continuación la comparación de los resultados obtenidos por los diferentes métodos de los que se dispuso para contrastar la medida de la velocidad constante, y poder validar los algoritmos de medida.

La Fig. 4.8 muestra la evolución del voltaje que se registra al hacer girar al volante a una velocidad de prueba constante de 568 rpm según el tacómetro digital.

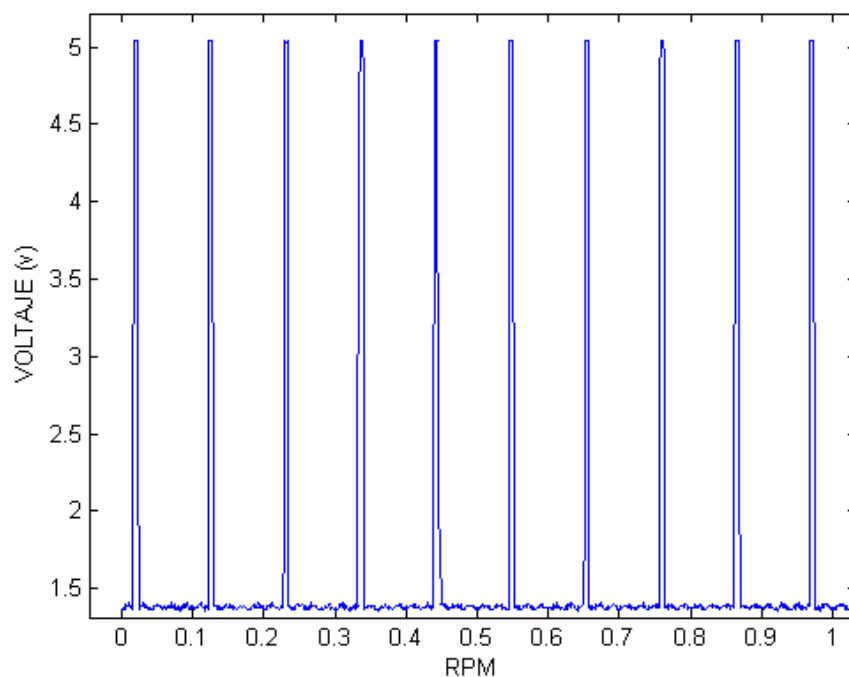


Fig. 4.8 – Ejemplo de trenes de pulso obtenidos a una velocidad constante de giro del volante. Se observa la variación en el nivel de voltaje ALTO-BAJO de los pulsos con el tiempo.

La señal del voltaje oscila entre los valores de 1,4V y 5V aproximadamente, cuando ésta se encuentra en un nivel bajo y alto respectivamente. La equidistancia de los pulsos es una señal del giro constante del volante.

Si aplicamos el algoritmo FFT a esta señal y la representamos en el dominio de la frecuencia, el primer pulso y sus sucesivos se corresponderán respectivamente a la frecuencia de giro, y a sus múltiplos.

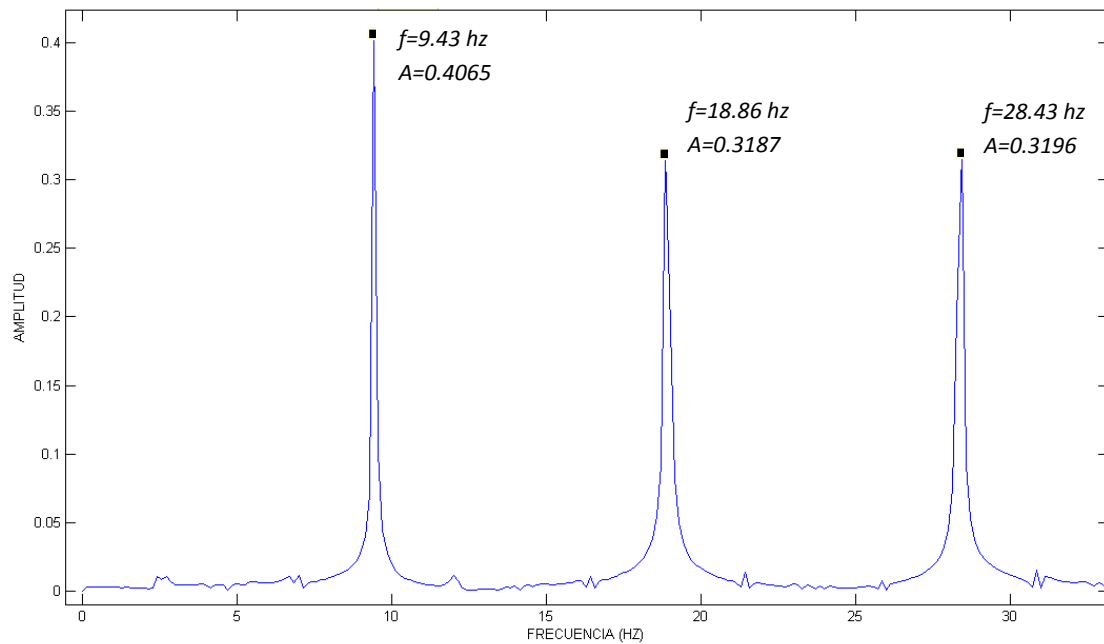


Fig. 4.9 – FFT del una señal de trenes de pulsos a velocidad constante

Como se muestra, la frecuencia del primer pico es de 9.43Hz, o equivalentemente 565.8 rpm. Aunque no coincide exactamente con lo registrado por el tacómetro, si que estamos muy próximos. Con los datos obtenidos de un ensayo realizado a la misma velocidad pero instantes después, se obtuvo una frecuencia en el primer pico de 9.502hz o 570 rpm. Aunque los valores pueden discernir en varias unidades respecto al considerado real, otorgado por el tacómetro, su valor medio si que tiende a tal resultado.

Por otro lado, si representamos la FFT de la señal entregada por el acelerómetro durante el mismo ensayo, obtenemos el siguiente diagrama en el dominio de la frecuencia, en el que se tiene un primer pico acusado a una frecuencia que coincide con la obtenida anteriormente, 9.43 hz.

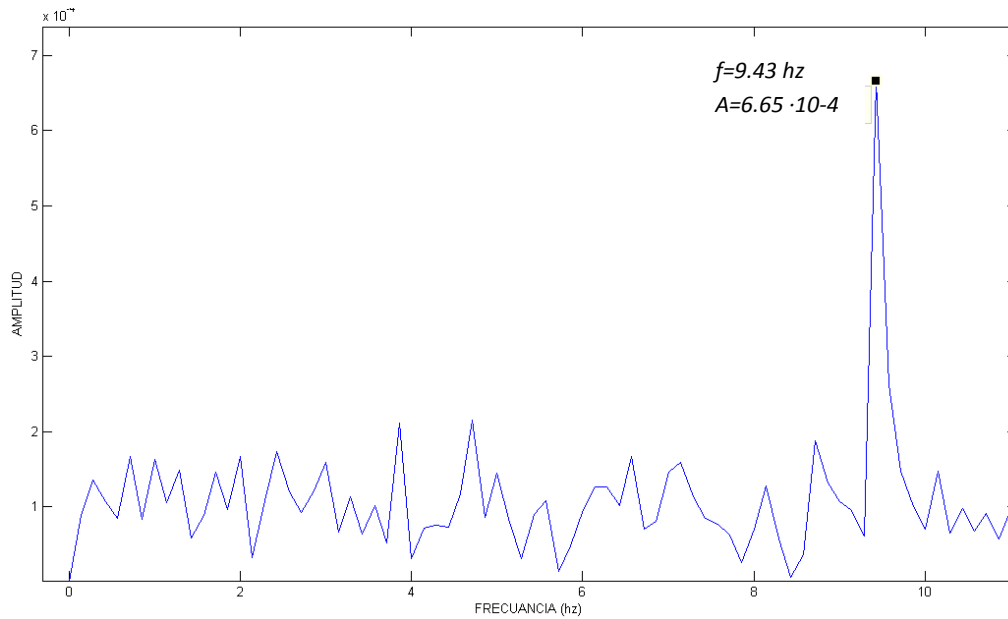


Fig. 4.10 – FFT de la señal entregada por el acelerómetro en un ensayo a velocidad constante.

Los resultados obtenidos en ensayos a diferentes regímenes de giro se muestran en la tabla de abajo, en la que se aprecia la coincidencia entre los resultados FFT de sendas señales.

VELOCIDAD TACOMETRO (rpm)	FFT señal sensor Reed (rpm)	FFT señal acelerómetro (rpm)
388	390	390
568	566	566
695	694	694
808	807	807

Por lo tanto, podemos concluir que la información suministrada en el dominio de la frecuencia por ambas señales, sensor reed y el acelerómetro, son un buen indicador del nivel de velocidad de giro constante del volante que nos indica el tacómetro.

4.4.2.- FORMA DE LOS PULSO. ALGORITMO PARA EL CÁLCULO DE LA VELOCIDAD. PROBLEMÁTICA

Para poder emplear la transformada FFT a la señal, y obtener así la velocidad de giro, se necesita de señales periódicas, esto es, de regímenes constantes de funcionamiento. Esta situación rara vez se produce durante los ensayos de motores reales, por lo que es necesario encontrar una metodología que nos permita analizar situaciones en aceleración, o trenes de pulsos no equiespaciados, como el de la Fig.4.8 y típico de una aceleración del volante partiendo del reposo.

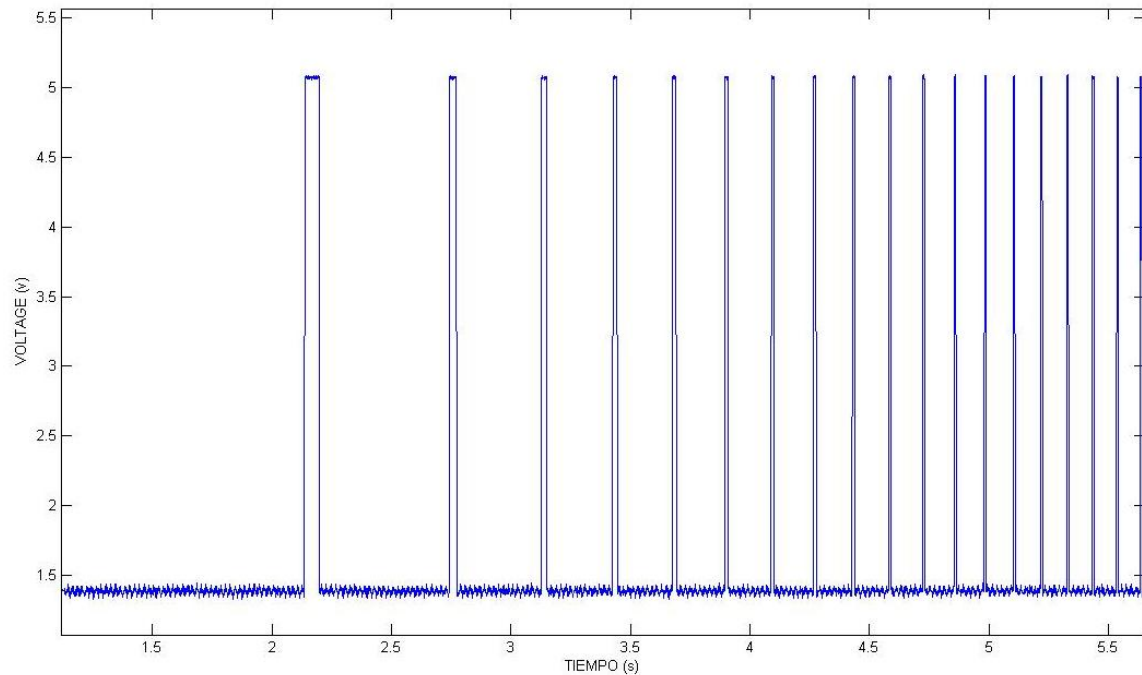


Fig. 4.11 – Ejemplo de los trenes de pulsos de una aceleración partiendo del reposo.

A partir de cierto instante inicial, comienzan a registrarse una serie de pulsos al nivel de tensión proporcionado por la salida de la tarjeta de adquisición que comienzan a estar más próximos entre sí conforme la velocidad de rotación aumenta. A su vez, el ancho de los mismos disminuye, como consecuencia de un menor tiempo de paso de los imanes por el sensor.

Como se conoce el intervalo angular entre cada pulso, dado por la distribución angular de los imanes en el volante, obteniendo el intervalo temporal de la grafica, como la distancia entre pulsos consecutivos, podemos determinar fácilmente la velocidad angular, siempre a intervalos discretos. Se necesitan por tanto conocer, la diferencia temporal entre pulsos sucesivos.

Puesto que la tarjeta de adquisición registra datos en instantes discretos, la gráfica de pulsos es en realidad una sucesión de puntos unidos mediante rectas.

La Fig.4.12 muestra en detalle los puntos de tres pulsos registrados en un ensayo a velocidad constante del volante de unas 500 rpm, una frecuencia de muestreo de 1000hz, y un solo imán. Como se observa, cuando el sensor reed no está excitado, el voltaje registrado permanece por debajo de 1,5V, mientras que al excitarse, éste se mantiene por encima de los 5V. Llama la atención la presencia de ciertos puntos, como los mostrados en los dos primeros pulsos, que cuentan con puntos intermedios dentro de la franja comprendida entre 1.5v <> 5v, fuera de los niveles definidos como bajo y alto respectivamente.

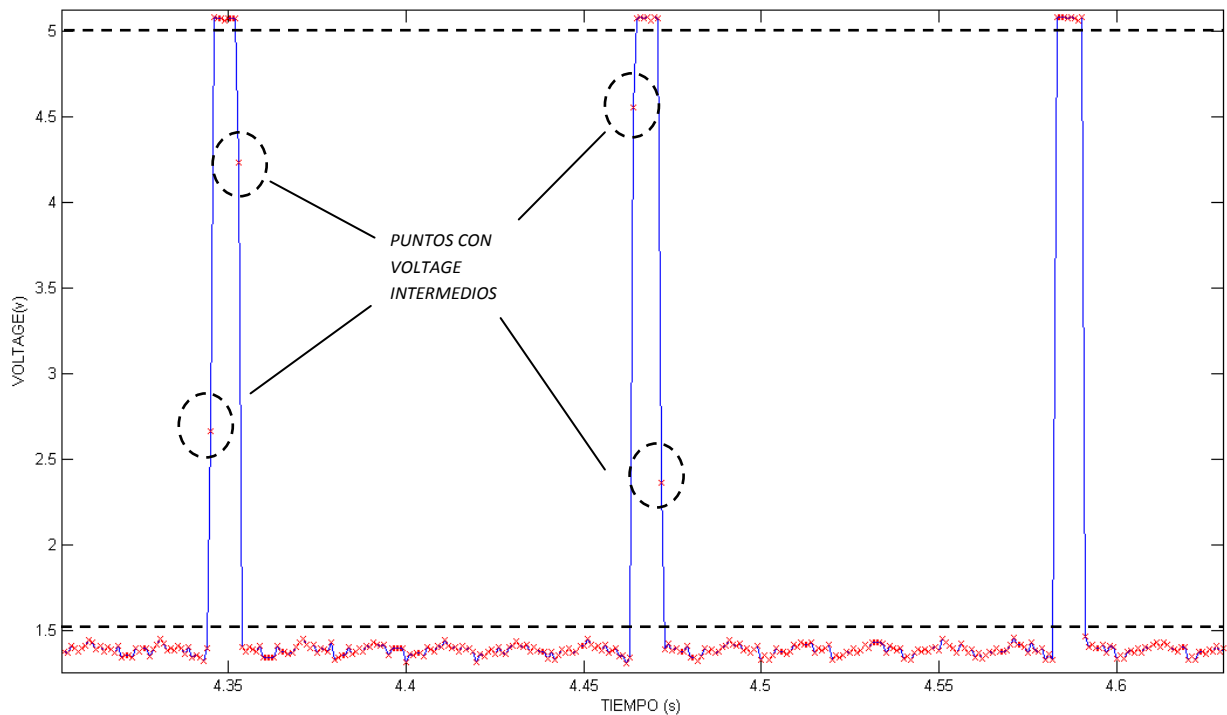


Fig. 4.12 – Detalle de los puntos que definen los trenes de pulsos. Se observa la presencia de 3 zonas de voltaje.

Aunque no está muy clara la causa de estos puntos, podrían deberse a la coincidencia de puntos de muestreo de la tarjeta con el proceso ‘no instantáneo’ de cierre o apertura del sensor REED, al estar registrándose una señal de forma analógica. De cualquier forma, los puntos en esta franja también nos están proporcionando información del paso del imán por el sensor, y por lo tanto, parece lógico tenerlos en cuenta a la hora de diseñar un algoritmo que calcule el intervalo temporal entre pulsos.

El problema que se presenta a la hora de determinar los intervalos entre pulsos es el de definir con precisión qué punto de los anteriores es representativo para definir un pulso y nos sirve para tomar referencias entre ellos.

Dos posibilidades se han considerado, denominadas respectivamente como, “*Algoritmo del punto inicial*” y “*Algoritmo del punto medio*” y se comentan a continuación.

ALGORITMO DE LOS PUNTOS INICIALES.

Se define este punto como el primero que muestra un cambio significativo del nivel de tensión registrado con respecto al nivel de tensión no excitado. De esta forma se tiene una evidencia segura del paso del imán por el sensor reed, y se tendría un punto de referencia entre los que poder medir los intervalos.

Para ello en primer lugar se empleó un algoritmo que analiza los diferentes puntos iniciales de cada pulso, y determina la diferencia temporal entre ellos. Algunas consideraciones son las siguientes

- Como criterio, se ha tomado que el punto que caracteriza el instante en que se produce un pulso, es el primero cuyo nivel de voltaje supera un determinado valor de referencia V_{ref} , por encima del nivel de tensión en reposo.

- Se han empleado dos contadores para conocer el estado de los puntos precedentes. Un contador n_0 , indica si ya se ha recibido un pulso previamente (valor '1'), o por el contrario todavía no (valor '0'). Esto se emplea para comprobar si el volante se encuentra en movimiento. Una vez se detecta el primer pulso, no se vuelve a inicializar a '0' hasta pasado un cierto tiempo lo suficientemente alto para que se considere que el volante se ha detenido.

Otro contador n_1 indica si el nivel de tensión del punto anterior ha sido alto (valor '1'), o bajo (valor '0') si su voltaje se encuentra respectivamente por encima o por debajo del voltaje de referencia.

Estos contadores se emplean para comparar sucesivamente puntos entre sí, y discernir si se trata del punto inicial de un ensayo, o si se trata de puntos intermedios a un pulso.

El algoritmo realiza un barrido de todos los puntos, comparando su valor con respecto al inmediatamente anterior para detectar el punto que define los pulsos. Los criterios que han de cumplir por tanto un punto para que se considere representativo de un pulso son:

1. Su voltaje ha de superar al voltaje de referencia V_{ref}
2. Ha de haberse detectado previamente un pulso en el ensayo, esto es, el contador n_0 ha de tomar el valor 1
3. El estado de tensión del punto inmediatamente inferior es bajo, esto es, el contador n_1 toma el valor 0.

Excepto para el punto inicial del ensayo, cualquier punto que no cumpla estas condiciones, no se considera representativo de un pulso. En caso de que se cumplan, se registra el instante de tiempo y se calcula la velocidad angular en este punto como el cociente entre el intervalo angular, conocido a priori, y el intervalo temporal obtenido como la diferencia entre el instante en el punto actual, menos el tiempo en el pulso inmediatamente anterior.

Para verificar la validez del algoritmo, se ha aplicado en primer lugar a un ensayo de velocidad constante y conocida con el fin de observar los resultados. La Fig.4.13 muestra la velocidad angular W (rpm) – t (s) como resultado de aplicar el algoritmo anterior a un ensayo a velocidad constante de 568 rpm.

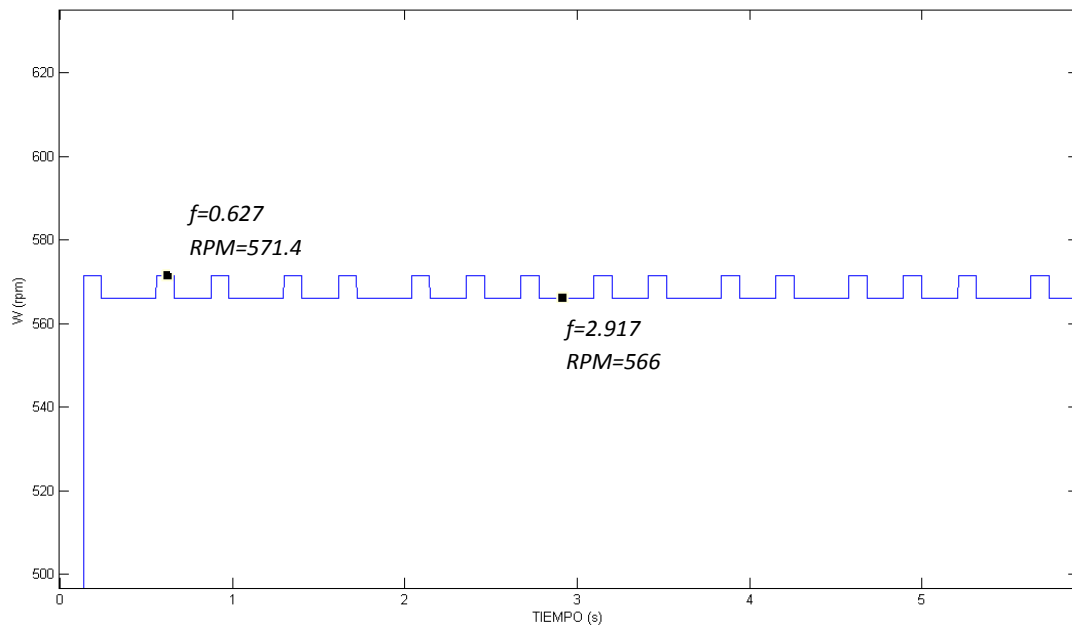


Fig. 4.13 – Registro de la velocidad en un ensayo a 568 RPM, mediante el algoritmo del punto inicial.

ALGORITMO DEL PUNTO MEDIO

Aunque el sencillo algoritmo anterior debería de proporcionar resultados razonables, en su utilización sólo se tiene en cuenta un punto de todos los que forman el pulso, por lo que de algún modo estamos perdiendo cierta información contenida en los mismos.

En este sentido, podría resultar interesante considerar el punto de referencia del pulso como su punto medio, definido éste como el punto equidistante entre el primero y último del pulso con un voltaje por encima del valor de referencia.

El algoritmo del punto medio realiza también un barrido de todos los puntos registrados, pero en esta ocasión con el objetivo de localizar la pareja de pulsos que definen el inicio y el fin del intervalo. Para ello, se guardan en sendas variables los instantes temporales de los puntos que cumplan las siguientes características:

1. Su voltaje se encuentra por encima del valor de referencia, estando el del punto anterior por debajo del mismo -> punto inicial del pulso t_{m1}
2. Su voltaje se encuentra por encima del valor de referencia, estando el del punto que le sigue por debajo del mismo -> punto final del mismo t_{m2}

Cada vez que se obtienen la pareja de valores t_{m1} y t_{m2} , se calcula el instante temporal equidistante entre ellos t_m , valor que se empleará como referencia entre pulsos sucesivos, y así calcular la diferencia temporal entre ellos.

Puesto que no es hasta el segundo pulso a partir de donde podemos tomar referencias para calcular la velocidad, un contador incremental permite diferenciar el primero del resto de pulsos. A su vez, el empleo de otro contador nos permite conocer el punto en el que se han obtenido la pareja de valores t_{m1} y t_{m2} correspondientes a cada pulso. En este caso, el contador se inicializa para permitir el cálculo del intervalo temporal i_t entre el pulso actual y el anterior (definido por el valor t_m del pulso anterior). Se actualiza el valor de t_m actual, se reinicia el

contador, y se vuelve a calcular el valor de la velocidad del mismo modo que se hizo en el algoritmo anterior.

La Fig.4.14 muestra el resultado de aplicar al mismo ensayo a velocidad constante de 568 rpm antes visto, el algoritmo del punto medio.

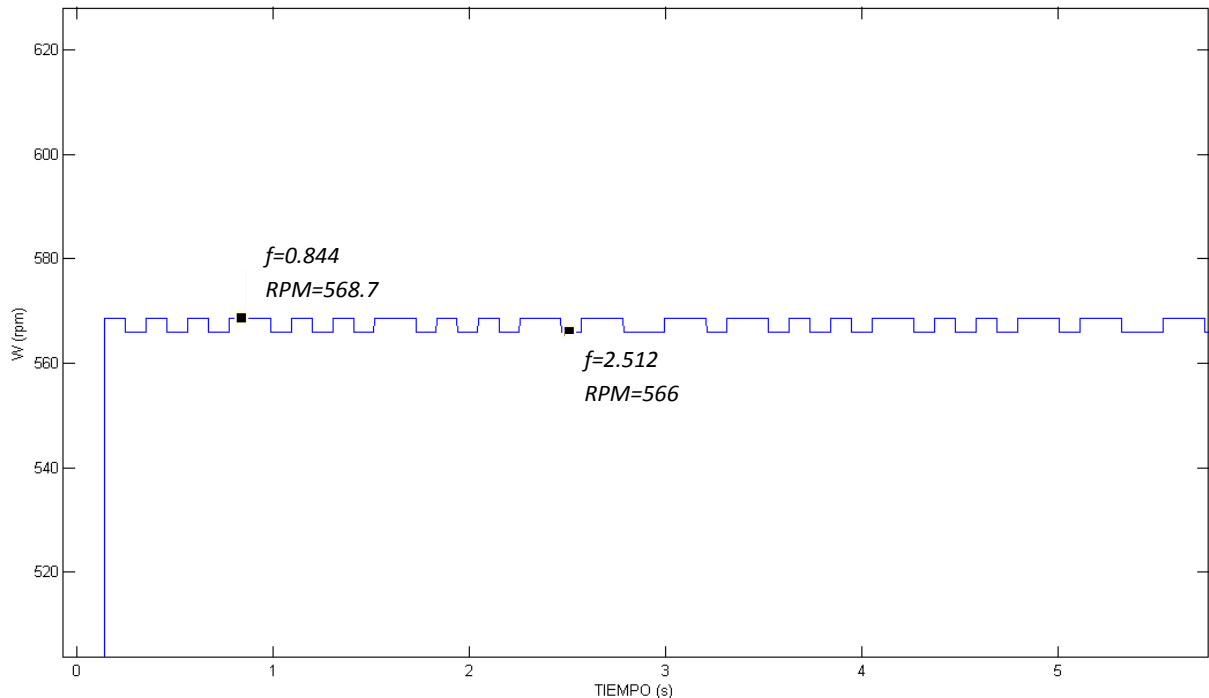


Fig. 4.14 – Registro de la velocidad en un ensayo a 568 RPM, mediante el algoritmo del punto medio.

PROBLEMÁTICA

Aunque los algoritmos anteriores aplicados a un mismo ensayo parecen proporcionar resultados razonablemente similares, queda claro que ambos resultados se alejan de la evolución constante de la velocidad esperada, y presentan una evolución de la velocidad que varía entre dos niveles siempre constantes, y que se alternan a una misma frecuencia.

El que se hayan obtenido resultados cualitativamente parecidos con ambos algoritmos, parece indicar que la evolución no constante obtenida se debe más al proceso de adquisición que a algún error del algoritmo.

Puesto que los algoritmos estiman la velocidad basándose en la distancia entre puntos de referencia de pulsos sucesivos, ya sean los puntos iniciales o los puntos medios, necesariamente estas oscilaciones en la velocidad se deben a puntos que se registran periódicamente con un cierto adelanto o retraso.

Sin embargo, la clara periodicidad en la alternancia de la velocidad observada parece indicar que el fenómeno mostrado se deba más bien a posibles desfases entre la señal emisora y el muestreo de las mismas por la tarjeta de adquisición.

En efecto, puesto que el cálculo de la velocidad se basa en la medida del tiempo transcurrido entre excitaciones sucesivas del sensor, para una correcta estimación de la

misma, el sistema de adquisición debería de permitir la medida del tiempo del paso del emisor (imán) por el captador (sensor reed) en un punto situado siempre en la misma posición relativa entre ambos (posición teórica de medida), y dada por aquel ángulo en el que la intensidad del iman comienza a ser lo suficientemente intensa para excitar al sensor.

Debido al proceso no continuo de muestreo, esto puede no ser siempre posible dado el posible desfase entre el instante determinado por esta posición teórica de medida y el instante de muestreo real de la tarjeta de adquisición de datos, dependiente de la frecuencia de muestreo.

En este sentido, el máximo intervalo de variación que se esperaría en la velocidad por el hecho de que para su cálculo, en vez de emplear siempre como referencia el instante que define la posición teórica de medida, se empleara para el pulso siguiente, un instante desfasado un periodo antes o después de la frecuencia de muestreo, vendría dado por:

$$\omega_{\min} = 1 + \frac{1}{t \cdot f} < \omega < 1 - \frac{1}{t \cdot f} = \omega_{\max} \quad 4.3$$

Donde ' ω ' es la velocidad real giro, ' t ' es el intervalo temporal teórico correspondiente a esta velocidad de giro, ' f ' es la frecuencia de muestreo y ' $\omega_{\min}$ ' e ' $\omega_{\max}$ ' las velocidades extremas del intervalo respectivamente

Esto nos define un rango o zona de variación máxima, centrada en la velocidad real, dentro de la cual puede encontrarse nuestra velocidad medida.

En realidad se trata como si el instante inicial que define cada pulso, en vez de corresponderse con un punto definido, se correspondiera con una zona de cierta tolerancia en la que la amplitud de esta zona es dos veces el periodo de la frecuencia de muestreo, como se muestra en el esquema de la figura 4.15.

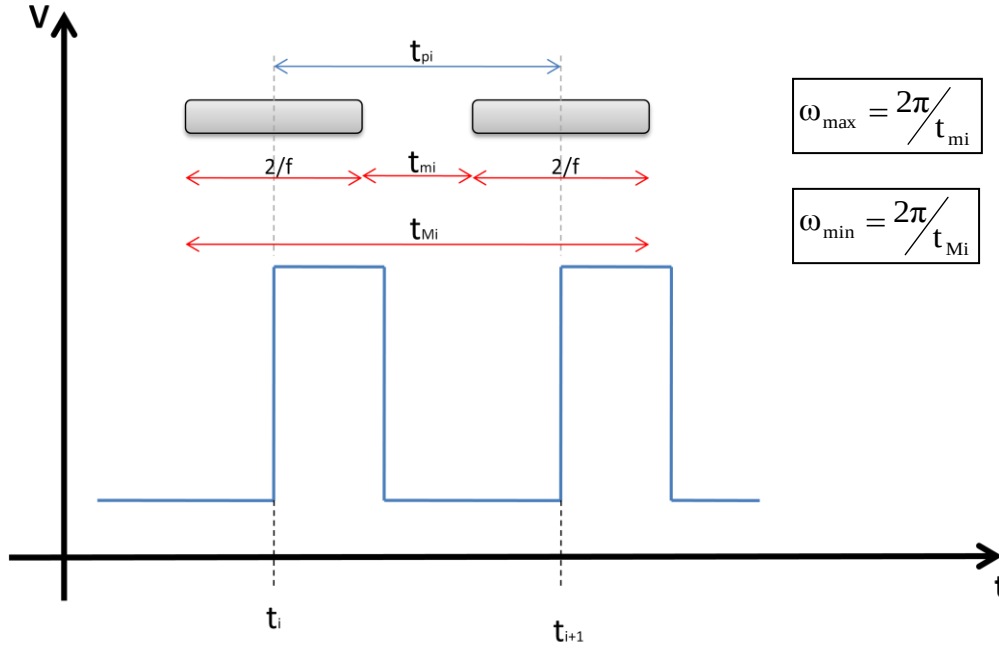


Fig. 4.15 -- Esquema de referencias temporales entre pulsos

La referencia temporal de cada pulso podría por tanto encontrarse entre la zona definida entre t_{Mi} y t_{mi} lo que nos proporciona el rango de velocidades antes definido.

En particular, si tenemos el rotor girando a una velocidad como en el ensayo anterior, en la que $\omega = 568 \text{ rpm}$ ($t = 0,106 \text{ s}$), si entre un pulso y el siguiente, en vez de transcurrir exactamente el intervalo temporal dado por ' t ', tomásemos sendos instantes desfasados un periodo de tiempo de la frecuencia de muestreo, aplicando 4.3, las velocidades extremas observadas serían $562.67 < \omega < 573.43$.

Efectivamente, de las gráficas de los ensayos se observa como las velocidades obtenidas (566 y 571.4 rpm) para la gráfica 4.13, y (566 y 568.7 rpm) para la 4.14, se encuentran ambas dentro del intervalo anterior.

Dadas por tanto las variables implicadas directamente en cada ensayo, esto es, velocidad de giro, número de imanes empleados, y la frecuencia de muestreo, sería interesante analizar qué efecto tiene cada una de ellas en el proceso de muestreo y en los resultados obtenidos en ensayos de velocidad constante.

A su vez, como se ha mostrado con las gráficas 4.13 y 4.14, el empleo de un algoritmo u otro también influye en la precisión o proximidad de los datos obtenidos con respecto al valor real, por lo que no sólo los factores intrínsecos al ensayos son los que condicionan la media obtenida, sino también su posterior procesado.

4.4.3.- FACTORES QUE AFECTAN A LA FORMA DE LA SEÑAL OBTENIDA.

- ELECCION DEL ALGORITMO; Voltaje de referencia

Como quedó claro en el apartado anterior, los datos recogidos de un mismo ensayo pueden proveer de resultados diferentes en función del algoritmo empleado para su interpretación. Aunque dos son los algoritmos aquí descritos, estos no son más dos de los posibles criterios de selección de datos que nos permiten una estimación de la velocidad.

Parece clara la mejoría introducida por el algoritmo del punto medio con respecto al del punto inicial, observada en un intervalo de variación de la velocidad que acota más estrechamente al valor real. Posiblemente esta mejoría se deba a la tendencia a aminorar el efecto que ciertos puntos, captados con cierto adelanto o retraso, tengan sobre el resto, como podría ser el caso de los puntos intermedios señalados en la gráfica 4.12.

Sea cual sea el algoritmo empleado, es necesaria la introducción de un valor de voltaje referencia que es la que nos determina el criterio de comienzo de detección de un pulso. Cuanto más próximo sea su valor con respecto al valor “bajo” de tensión, más puntos con un voltaje intermedio se tendrán en cuenta por el algoritmo.

Mientras que con el algoritmo del punto inicial no se observa ninguna variación en los valores extremos de la velocidad al variar el voltaje de referencia desde uno próximo al nivel bajo hasta uno próximo al nivel alto, con el algoritmo del punto medio, a partir de cierto valor, el intervalo dado por la diferencia entre los valores extremos de la velocidad obtenida aumenta.

La Fig.4.16 muestra esta variación para el ejemplo del ensayo a giro velocidad constante anterior.

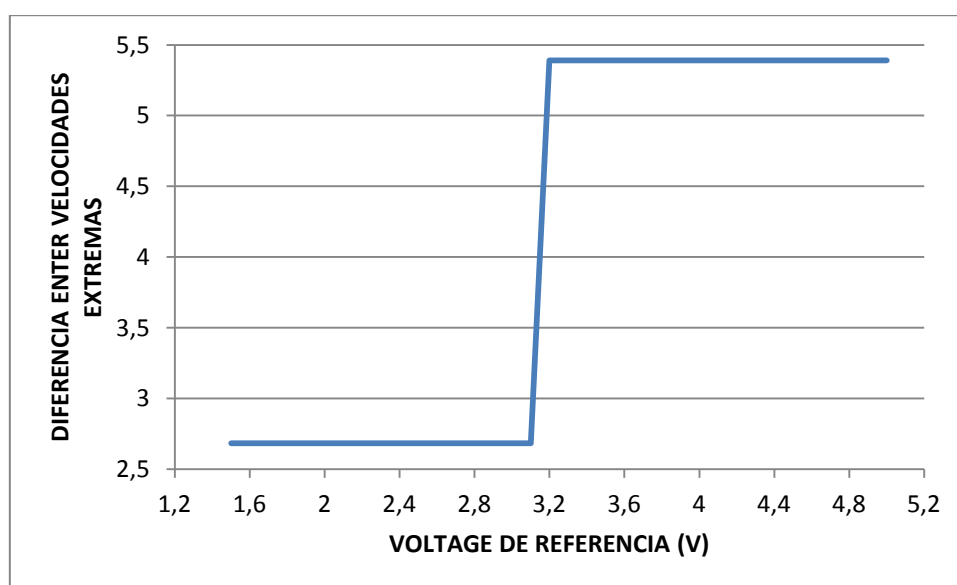


Fig. 4.16 – Se muestra el aumento en la diferencia entre las velocidades extremas obtenidas con el algoritmo del punto medio, al aumentar el voltaje de referencia.

Se observa como por encima de un valor del voltaje de referencia de 3.1V, el intervalo aumenta casi el doble, lo que significa que la mayoría de puntos con un voltaje intermedio se encuentran por debajo de esta referencia.

Por lo tanto, se prueba la necesidad de tener en cuenta al mayor número de estos puntos, manteniendo para ello el voltaje de referencia lo más bajo posible, siempre guardando un cierto margen con el nivel “bajo” de tensión, para asegurar, sea cual sea el ensayo, que se están teniendo en cuenta los puntos a cualquier nivel de tensión.

Para diferentes resultados mostrados de aquí en adelante, se empleará el algoritmo del punto medio con un valor del voltaje de referencia de 1.5V.

- EFFECTO DEL AUMENTO DE LA VELOCIDAD DE GIRO

La ecuación 4.3 estima que a mayor velocidad de ensayo, mayor será la amplitud del intervalo de velocidades obtenido, tal como se muestra en la imagen inferior que representa el máximo porcentaje de error obtenible al aumentar la velocidad, para una frecuencia de muestreo fija de 1000hz (grafico azul).

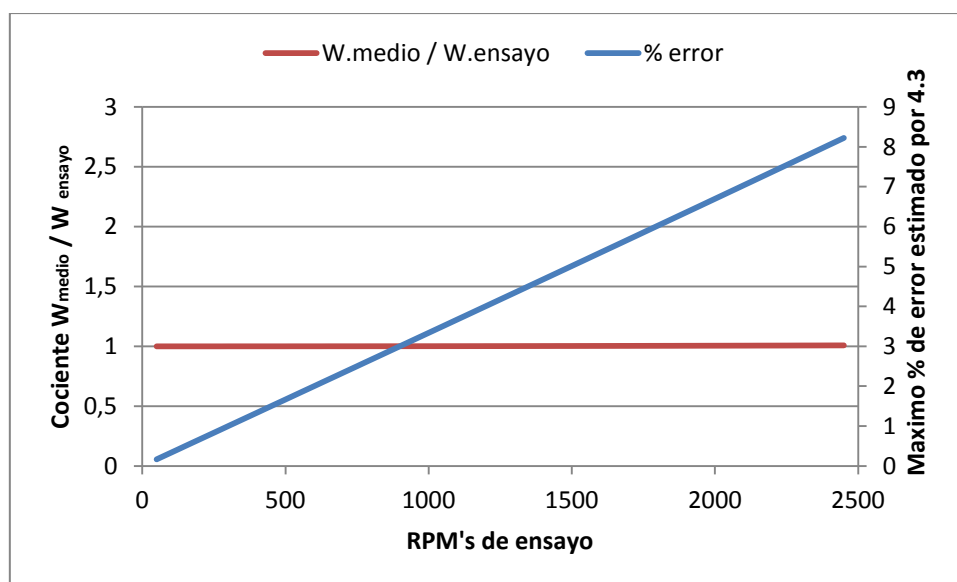


Fig. 4.17 – Aumento del porcentaje de error obtenido al aumentar la velocidad de giro, y invariabilidad de la velocidad media de adquisición con respecto a la velocidad de ensayo.

Sin embargo, como también se muestra, la media de ambas velocidades extremas sí coincide siempre con la velocidad teórica del ensayo (grafica roja).

Esta tendencia se corrobora con los datos obtenidos de diferentes ensayos realizados a velocidades constantes y respectivas de 388, 455, 568, 695 y 808 rpm, resumidos en la siguiente tabla:

W ensayo (tacómetro)	W máx. medida	W min medida	W media
388	389	387	388
455	454	456	455
568	566	569	567
808	811	800	805
1014	1008	1017	1013

Aunque en general las velocidades máximas y mínimas tienden a distanciarse, la velocidad media se mantiene muy próxima al valor real de la velocidad, difiriendo en un máximo de 3 rpm's en los ensayos anteriores, lo cual es un margen bastante aceptable.

- EFFECTO DE LA FRECUENCIA DE MUESTREO.

La expresión 4.3 y la lógica predicen un efecto inverso de la frecuencia de muestreo con respecto al de la velocidad de giro, lo que nos conduciría a que un aumento en la frecuencia o velocidad de muestreo nos llevaría a un menor intervalo de variación de la velocidad, que tendería a cero para una frecuencia infinito.

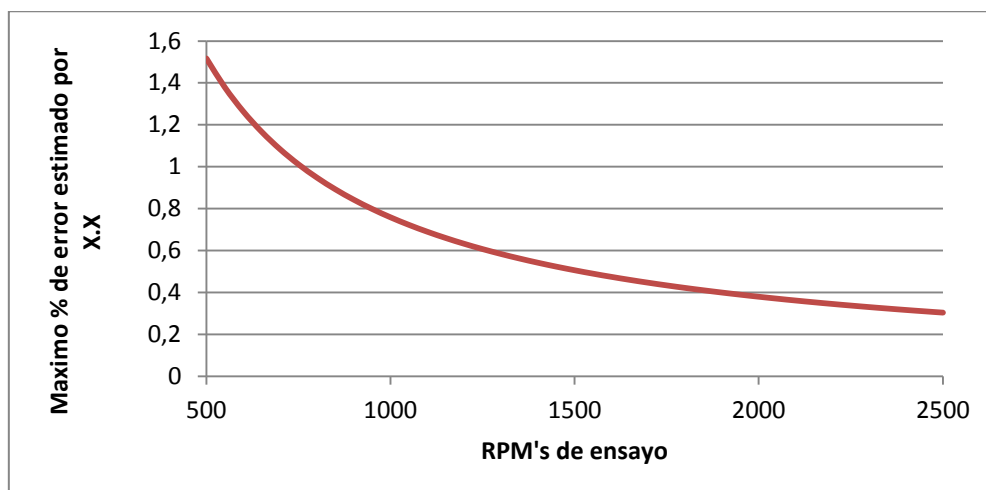


Fig. 4.18 – Efecto del aumento de frecuencia de muestreo con el error estimado en la medida de la velocidad.

Algunos resultados de las pruebas realizadas variando las frecuencias de muestreo se resumen en la tabla a continuación:

W ensayo	Frecuencia de muestreo	W max	W min	W media
455	500	460	449	454
	1000	458	454	456
	2000	456	454	455

Como se muestra, aunque el rango de variabilidad de la velocidad disminuye al aumentar la velocidad, la velocidad media permanece sin grandes variaciones cerca del valor de la velocidad de ensayo.

En la mayoría de ensayos se ha empleado una frecuencia de muestreo de 1000hz por ofrecer un buen equilibrio entre precisión y necesidad de reserva de memoria, aunque siempre que se pueda, y para futuros ensayos, se deberá intentar emplear la máxima frecuencia de muestreo permitida, según la disponibilidad de memoria.

- EFFECTO DEL NUMERO DE IMANES EMPLEADO.

El efecto que se pretende al emplear un mayor número de imanes que exciten el sensor es el de tener una información más fiel de la velocidad real del volante en cada instante, de forma que la velocidad de éste varíe lo mínimo posible entre pulsos sucesivos de los mismos.

A priori, no es de esperar que varíe el rango de variación de la velocidad proporcionada por el algoritmo en un ensayo a velocidad constante, sino más bien, la frecuencia de variación de la misma. Al aumentar el número de imanes, la frecuencia con que se ve excitado el sensor aumenta proporcionalmente al mismo.

Las Fig.4.19-4.22 se correspondientes a ensayos realizados con 1 y 3 imanes, a velocidades entorno a 500 y 1000 rpm respectivamente.

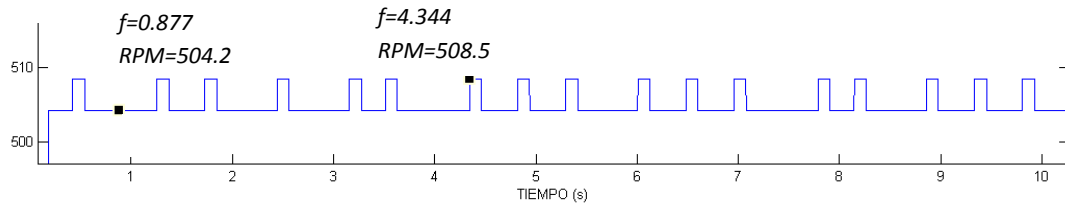


Fig. 4.19 – Registro de la velocidad en un ensayo a 505 RPM con 1 imán.

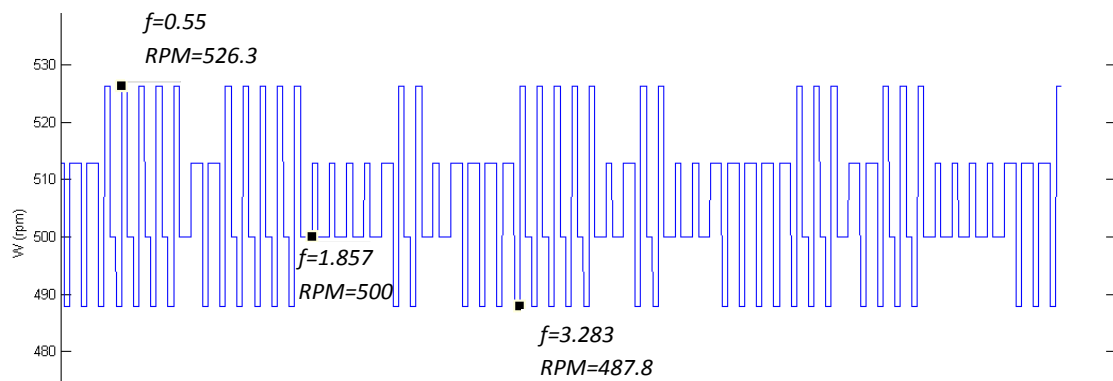


Fig. 4.20 – Registro de la velocidad en un ensayo a 505 RPM con 3 imanes.

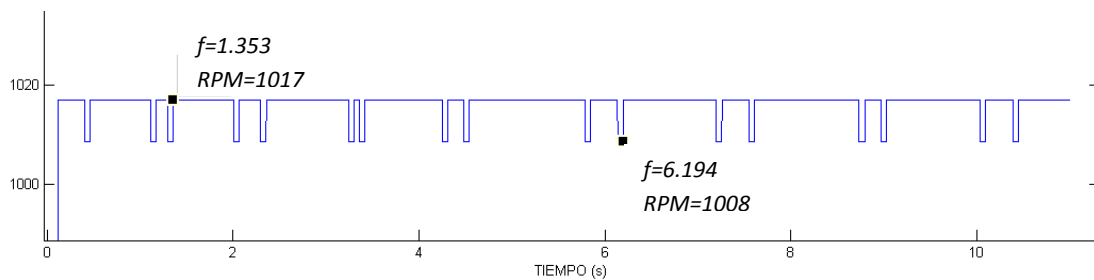


Fig. 4.21 – Registro de la velocidad en un ensayo a 1014 RPM con 1 imán.

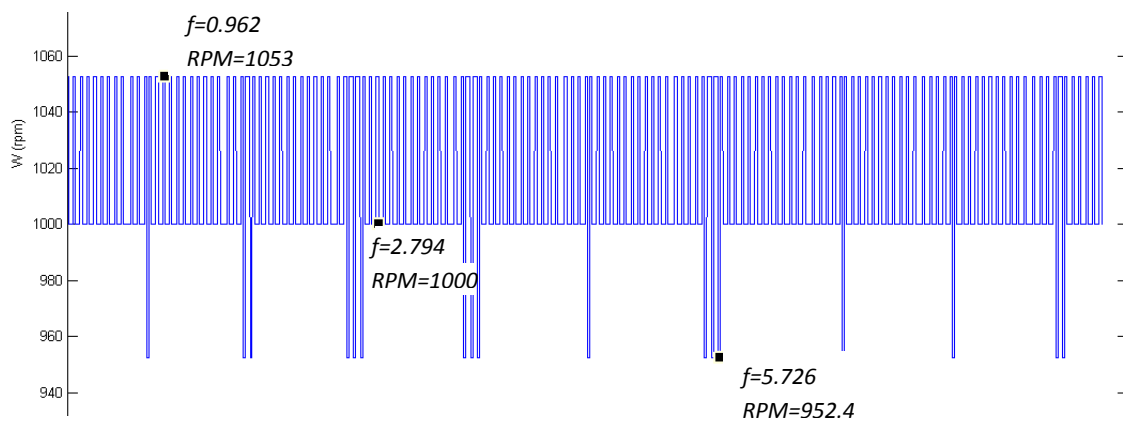


Fig. 4.22 – Registro de la velocidad en un ensayo a 1015 RPM con 3 imanes.

Como se observa, el aumento del número de imanes no solo aumenta el rango de variación de la velocidad, sino que, debido a la dificultad añadida de necesitar un correcto equiespaciado entre ellos, se posibilita el que ahora aparezcan velocidades intermedias asociadas a los diferentes espaciados relativos entre imanes, lo que produce el incremento de las perturbaciones observadas en las gráficas. Los resultados de éstas se resumen a continuación.

W ensayo	Nº Imanes	W max	W min	W media
505	1	509	504	506
	3	488	526	507
1015	1	1000	1016	1009
	3	952	1052	1003

Puesto que el único argumento para el empleo de varios imanes es el aumento de la precisión a la hora de trazar la grafica $W - t$, parece claro, vistos los resultados, que deberemos mantener el número de imanes empleados tan bajo como la precisión deseada nos permita. Para la sucesión de ensayos que se realizaron se mantuvo el empleo de un solo imán.

4.4.4.- ENSAYOS EN ACELERACION

Hasta ahora, el objetivo de los diferentes ensayos realizados no ha sido otro que el de familiarizarnos con las diferentes variables involucradas en el proceso de adquisición de datos y de ver el efecto que éstas tienen en la calidad de los resultados empleados, aplicados a casos sencillos de velocidad constante donde se disponía de otros medios para comparar los resultados. Conocer mejor la influencia de éstas variables nos permite un mejor reglado a la hora de llevar a cabo los ensayos en aceleración.

El objetivo último de estos es el de permitir el registro de una velocidad de cualquier variación entre un rango de 0 a 2500 rpm.

La Fig.4.23 muestra el ejemplo de una gráfica W-t de un ensayo con un solo iman en el que partiendo del reposo, se hace acelerar el volante hasta alcanzar una velocidad aproximada de 1500 rpm, manteniéndose ésta durante un tiempo aproximado de un segundo.

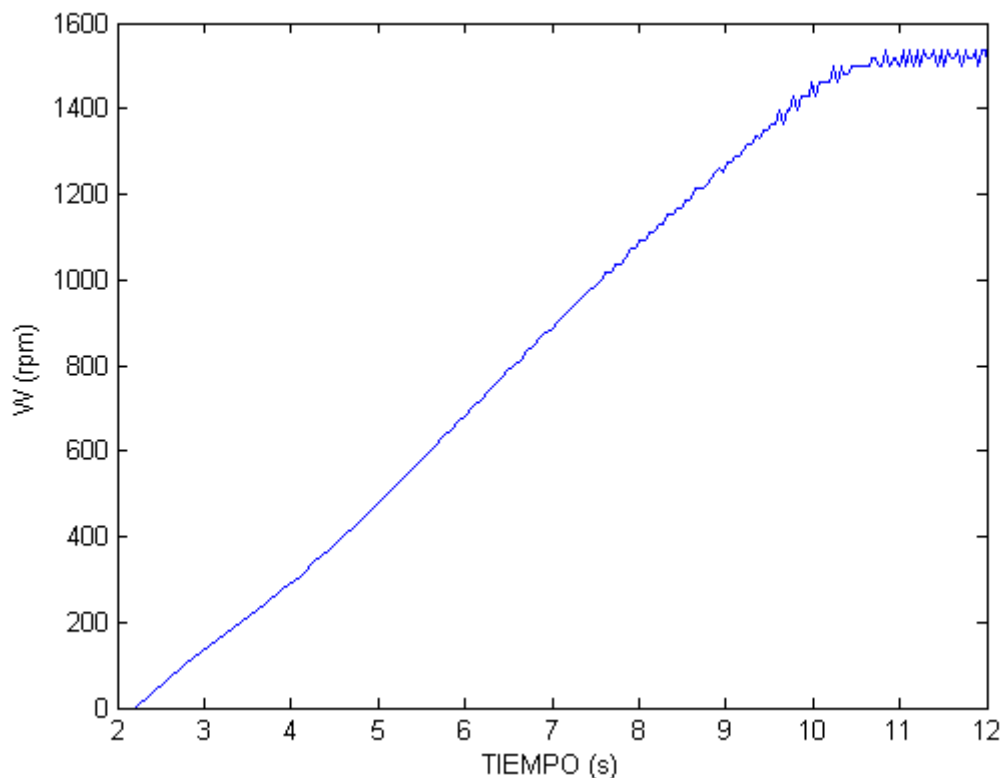


Fig. 4.23 – Ejemplo de grafica de aumento de la velocidad hasta régimen constante.

Una de las cosas que primero llama la atención con respecto a los ensayos a regimen constantes, es que los fenómenos oscilatorios de la velocidad antes observados a cualquier régimen de giro, en esta ocasión no parecen ser importantes hasta que la velocidad supera cierto nivel. Si bien estas variaciones se debían a pequeños retrasos o avances localizados en la adquisición de la medida, estos efectos parecen enmascarse por debajo de ciertos regímenes en los que prevalece el hecho de que los pulsos se encuentren continuamente más próximos entre sí, dada la aceleración del volante.

Sin embargo, a partir de cierta velocidad de giro, la amplitud del intervalo de variación de la velocidad comienza a ser lo suficientemente importante como para que estos lleguen a

intersectarse entre sí, pudiendo darse el caso de que el límite superior de una velocidad se encuentre por encima del régimen inferior de una velocidad inferior. En este caso, es posible que se registren descensos localizados de la velocidad, incluso cuando la velocidad real del volante se encuentra siempre en aumento.

Podemos estimar el régimen a partir del cual podría observarse en teoría este fenómeno, representando para diferentes velocidades de giro, el margen que existe entre el límite superior dado para una velocidad de giro, y el límite inferior correspondiente a una velocidad de giro algo superior. El régimen a partir del cual este incremento comienza a ser negativo nos proporciona la velocidad estimada a partir de la cual podría producirse este fenómeno.

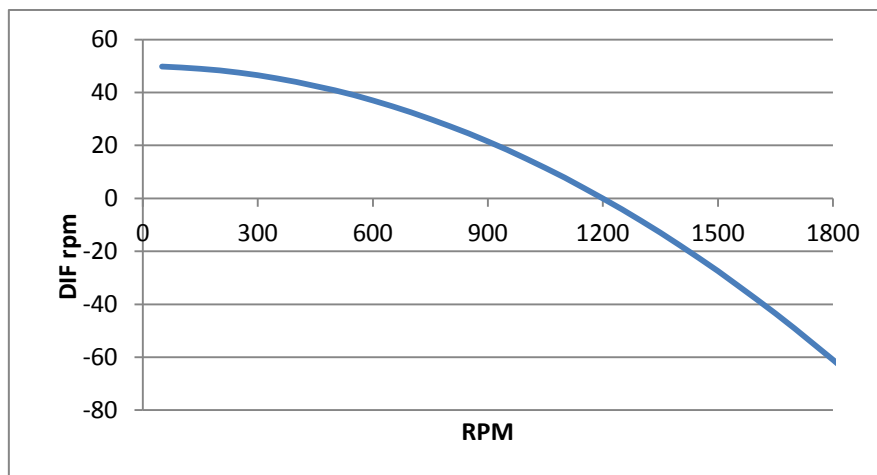


Fig. 4.24 – Grafica que muestra a partir de qué régimen de giro se estima que pueden producirse superposiciones en niveles de velocidad próximos entre sí.

La gráfica predice como a partir de una velocidad de unas 1200 rpm, podrían en teoría observarse descensos en la velocidad medida aun cuando incluso la velocidad real siga en aumento.

En la práctica, para el caso particular de la aceleración hasta las 1500 rpm antes mostrado, el primer descenso de la aceleración se detecta a un régimen de 1250 rpm, como se observa en la imagen a continuación la que se muestra un zoom de la grafica de aceleración anterior.

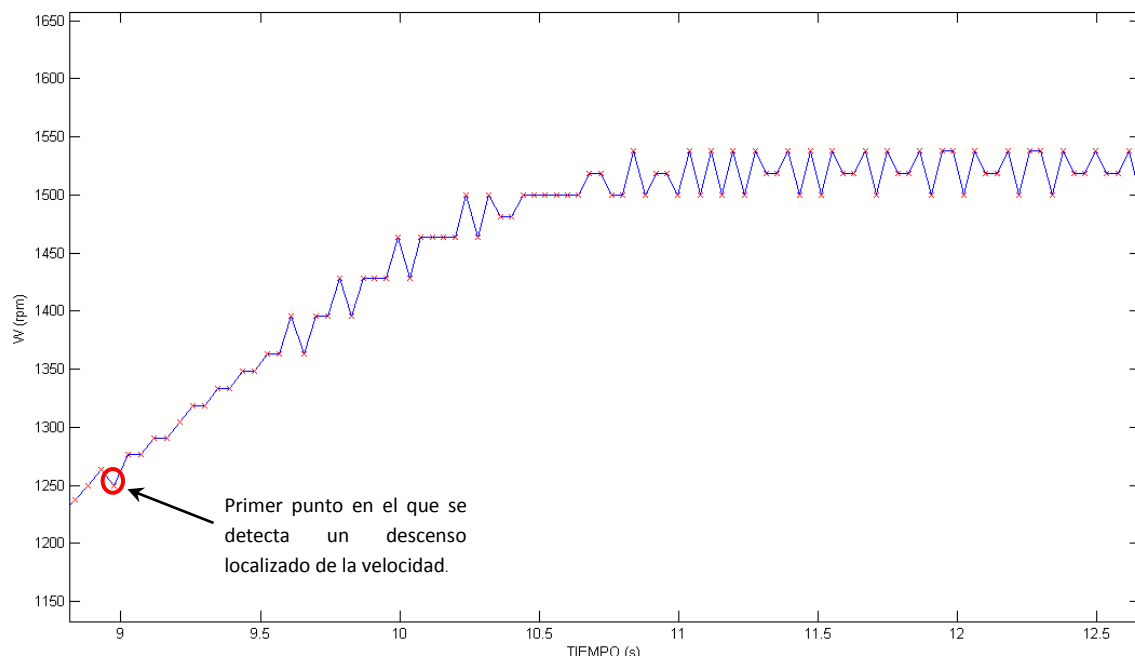


Fig. 4.25 – Zoom de la grafica de aceleración que muestra las variaciones locales de velocidad.

A partir de este punto, los descensos aparecen de forma más o menos aleatoria, hasta alcanzar el régimen constante de velocidad, donde ya sabemos que este fenómeno siempre se produce.

Queda claro por lo tanto, que para obtener resultados aceptables de la evolución de la velocidad, estos puntos que introducen un descenso aun cuando la tendencia real de la velocidad es ascendente, han de ser eliminados. Para ello se propone un algoritmo que identifique estos puntos y los elimine del registro de velocidades.

A su vez, el algoritmo se empleará para eliminar puntos que, aun no introduciendo un descenso de la velocidad, mantienen su valor constante con respecto al punto inmediatamente anterior. Estos puntos que suelen aparecer cuando la tasa de aceleración comienza a ser tan reducida que no se detecta variación apreciable en la velocidad del volante entre dos regímenes similares, seguramente debido a una baja resolución del sensor, restan claridad a la interpretación de la velocidad e introducen oscilaciones que no son reales.

El resultado de aplicar el algoritmo anterior a los datos originales de velocidad lo denominaremos, *registro procesado de velocidades*. A continuación, se muestra estos puntos rodeados en verde para el ejemplo anterior de una aceleración hasta un régimen de 1500 rpm.

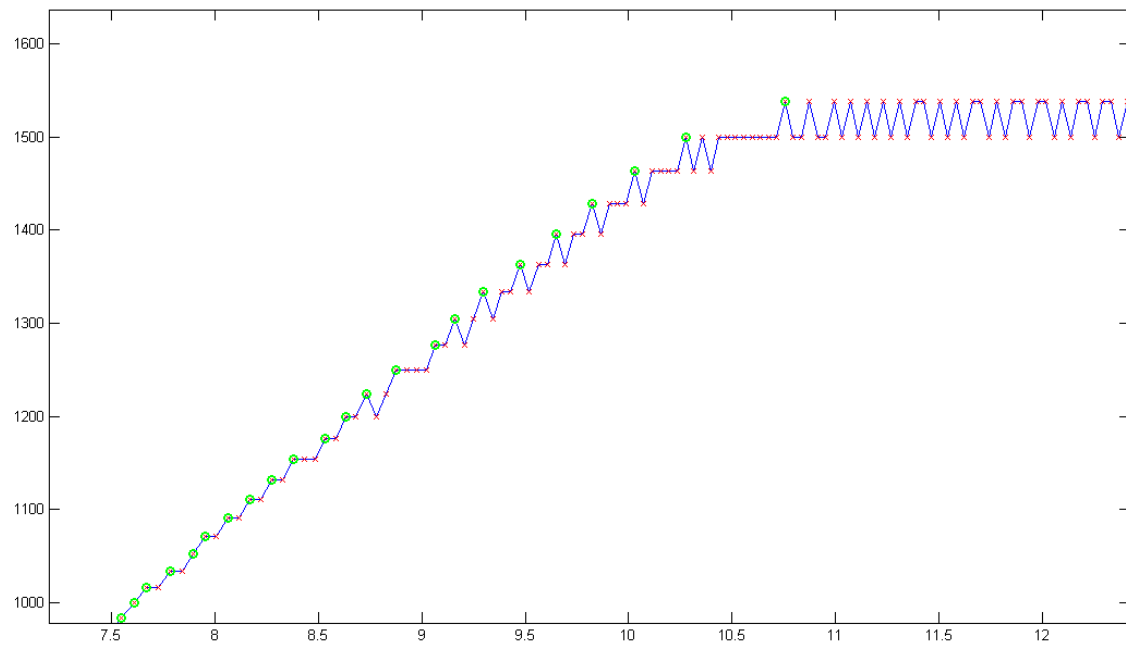


Fig. 4.26 – Zoom de la gráfica de aceleración en la que se han eliminado los descensos e invariaciones locales de la velocidad.

Como se muestra, el algoritmo selecciona los puntos situados en las crestas que definen la gráfica y elimina valores contiguos y repetidos de la velocidad.

Algunos ensayos con diferentes perfiles de velocidad se llevaron a cabo para probar la adaptabilidad de los algoritmos a comportamientos diversos de la misma. Algunos de ellos se muestran a continuación.

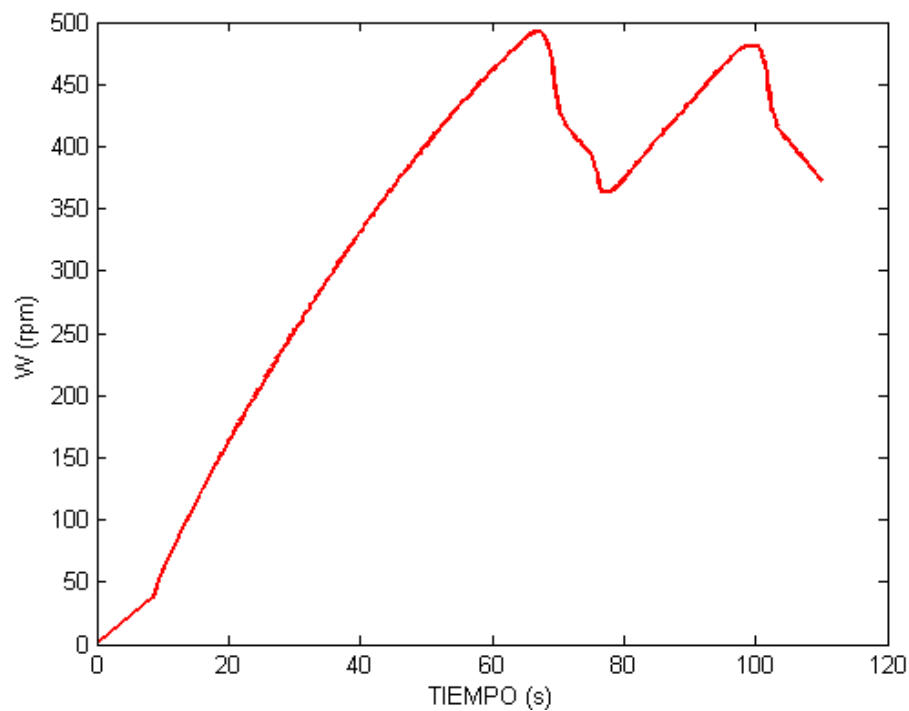


Fig. 4.27 – Ejemplo de evolución de la velocidad que partiendo del reposo, alcanza un régimen máximo entorno a 500 rpm para luego descender y aumentar de nuevo. Con él se pretende verificar el comportamiento de los algoritmos antes perfiles variables de velocidad.

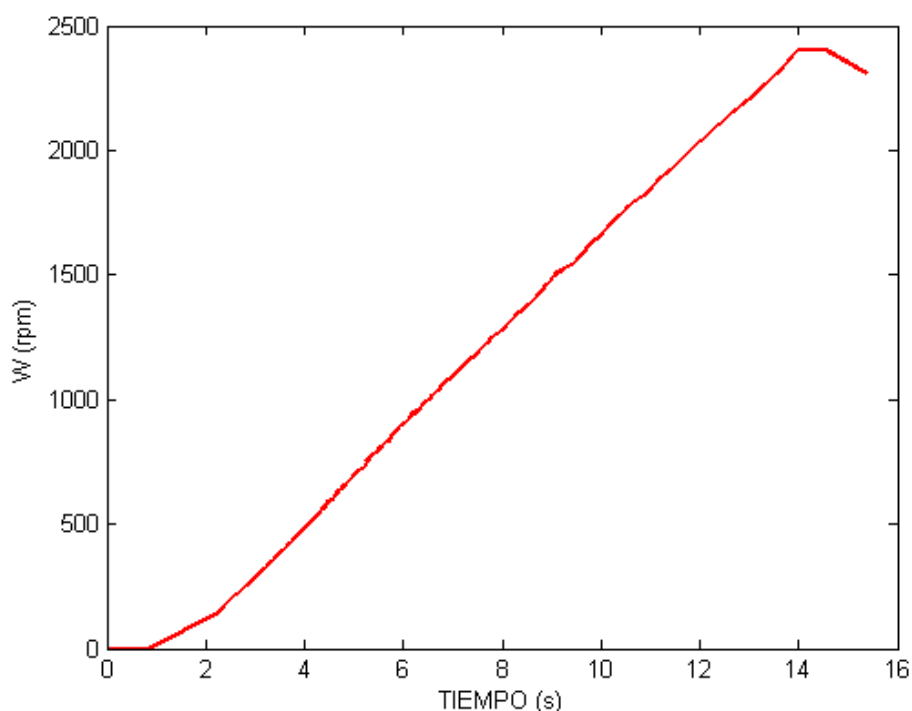


Fig. 4.28 – Ejemplo de evolución de la velocidad que partiendo del reposo alcanza un régimen máximo entorno a 2400 rpm. Se trata de un ensayo en el que se pretende comprobar el funcionamiento a velocidades máximas cercanas a las máximas previsibles en ensayos reales.

Los perfiles de velocidades esperados en aplicaciones reales del banco son similares a los mostrados en la Fig. 4.23; aceleraciones progresivas partiendo del reposo hasta alcanzar una tasa máxima, para posteriormente disminuir la aceleración hasta alcanzar progresivamente el máximo régimen de giro que permite el motor.

La zona de las curvas que nos interesan son las de los rangos de potencia efectiva típicas de los motores de pequeña y mediana cilindrada. Aplicando la reducción introducida por la transmisión, esto se traduce como ya vimos, en un rango entre 400 y 2400 rpm del volante.

4.4.5.- Estimación de las curvas de par y potencia.

Si bien ya se ha comentado con anterioridad que la finalidad de este capítulo 4 es el de la puesta a punto del sistema de adquisición de la velocidad, anticipándonos, en la medida de lo posible, al mayor número de situaciones posibles que nos encontraríamos en futuros ensayos reales del motor, en este subapartado las gráficas de par y potencias se corresponden al motor de prueba empleado, con lo que aunque estas si tienen gran validez práctica, sus datos carecen de un interés real.

La aplicación de las ecuaciones de la dinámica 4.1 y 4.2 nos permiten obtener la evolución del par y la potencia entregados por el motor durante el periodo de aceleración, partiendo de los datos de la velocidad, y hasta alcanzar el máximo régimen de funcionamiento del mismo. Si bien como vimos en el apartado anterior, el *registro procesado de velocidades* permitía eliminar diferentes defectos en la adquisición y representar una evolución de la velocidad muy acorde con la realidad, las primeras representaciones del par y potencia desvelaron un comportamiento muy oscilatorio las mismas.

El problema se presenta cuando necesitamos emplear los valores de la velocidad para estimar su derivada, la aceleración angular, y con ésta hallar la evolución del par y la potencia. Las pequeñas desviaciones con respecto a la evolución real afectan de forma especial a la hora de realizar la derivación numérica, lo que se traduce en un comportamiento muy fluctuante.

La Fig. 4.25 muestra el ejemplo de la evolución del par para el ensayo de aceleración hasta 1500 rpm partiendo del reposo de la Fig. 4.23, empleando para su obtención el *registro procesado de velocidades*.

En esencia, la evolución de la Fig. 4.29 es la que mostraría la aceleración angular, si bien la gráfica se muestra escalada por el factor de inercia, para representar el par.

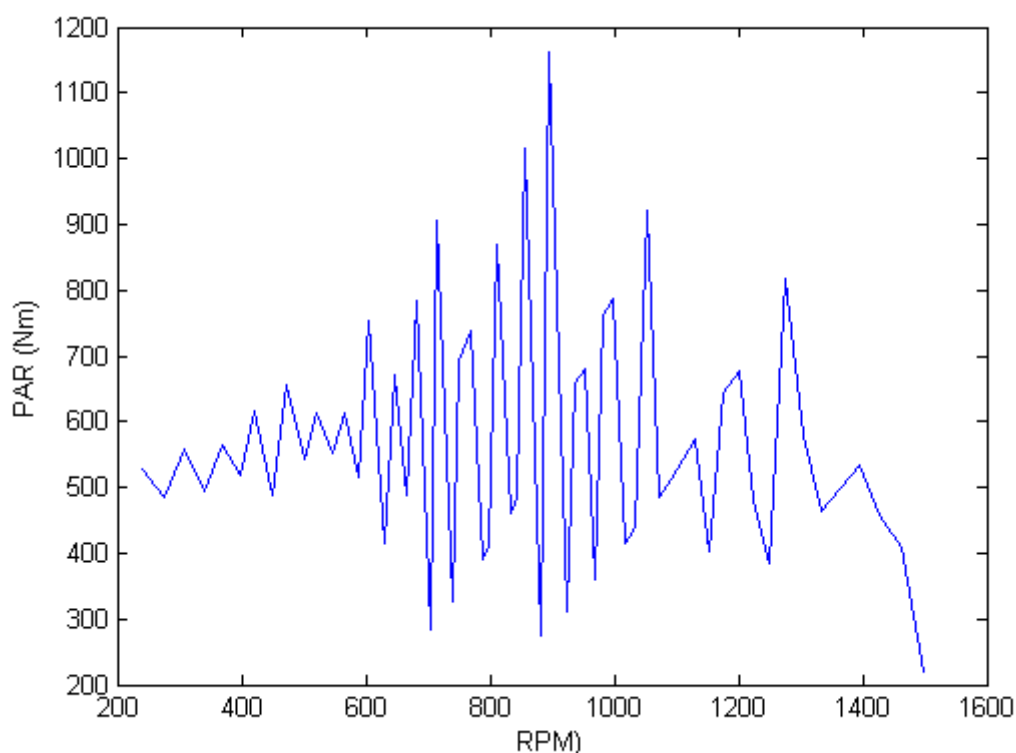


Fig. 4.29 – Evolución del par en una aceleración 0-1500 rpm calculada a partir del registro procesado de velocidades.

A la vista de la gráfica es fácil comprender como la alta variabilidad de los datos fruto de la derivación numérica resta aplicabilidad a los resultados obtenidos. En este sentido, parece necesario el empleo de algún método de ajuste de los datos para ganar claridad en los resultados.

Si bien un ajuste por mínimos cuadrados que se adapte a la tendencia que definen los datos en vez de al valor preciso de los mismo nos garantiza una mayor claridad y una evolución menos oscilante de los resultados, también es probable que nos reste cierta precisión sobre todo a la hora de estimar valores extremos. De cualquier forma, los errores de imprecisión cometidos por el propio ajuste siempre van a ser menores que los obtenidos por el propio proceso de muestreo.

El ajuste podemos aplicarlo directamente a los datos de par y potencia obtenidos, o bien previamente a los datos de velocidad (ya sean los originales o los posteriormente

filtrados). Dentro del régimen práctico de funcionamiento se ha comprobado que los resultados no varían en exceso en función de donde se realice el ajuste, si bien parece preferible aplicarlo ya para aproximar los datos de velocidad, de la que se tiene una mejor estimación a priori de cuál es su evolución. Esto nos permite verificar más fácilmente si la estimación empleada se aleja en exceso o no, de los datos de partida.

Especial importancia tiene la elección de la función de ajuste por mínimos cuadrados. Puesto que la evolución de la velocidad no ha de seguir a priori ninguna tendencia clara, la función genérica que mejor se adaptaría a los datos sería una expresión polinómica de los mismos, de un grado adecuado para poder ajustarse a cualquier variación posible de los datos de partida.

Puesto que el objetivo es poder estimar la derivada de la velocidad, el polinomio de aproximación debe de tener un grado lo suficientemente elevado para poder recoger toda la información relativa a los cambios de la pendiente de la curva de velocidad. Un grado del polinomio demasiado elevado podría introducir variaciones asociadas al mismo que no existan en la realidad, por lo que lo ideal sería elegir el menor grado que permita una correcta descripción de nuestros datos de velocidad. El menor grado posible sería de 3, para permitir los cambios de curvatura asociados a la aceleración inicial y a la desaceleración final al llegar al máximo régimen.

En la práctica convendrá elegir un grado u otro dependiendo del perfil de velocidades real que se tenga. Un buen criterio podría ser tomar aquel grado a partir del cual no se obtengan grandes diferencias al continuar aumentándose.

Algunas consideraciones a tener en cuenta son que la curva de ajuste de la velocidad debe tener una pendiente creciente al inicio, asociada al aumento de la velocidad desde el reposo, y una pendiente decreciente al final, hasta permanecer constante, asociado al decremento de la aceleración hasta llegar a un régimen permanente. Por lo tanto, las curvas de par y potencia asociadas, deben de comenzar con un aumento en su magnitud, y terminar decreciendo.

A continuación se muestran las curvas de ajuste de la velocidad (partiendo de los datos procesados), de par y potencia resultantes para el caso ya visto de aceleración de la Fig. 4.19. En este caso parece correcto ajustar la curva de velocidad empleando un polinomio de grado 5, pues es el primer grado que aproxima bien las pendientes al inicio y al final de la curva de velocidad.

A su vez, el empleo de un polinomio de grado 6 no introduce grandes diferencias en las curvas de par y potencias obtenidas, como se muestra comparativamente en las Fig 4.30 – 4.32.

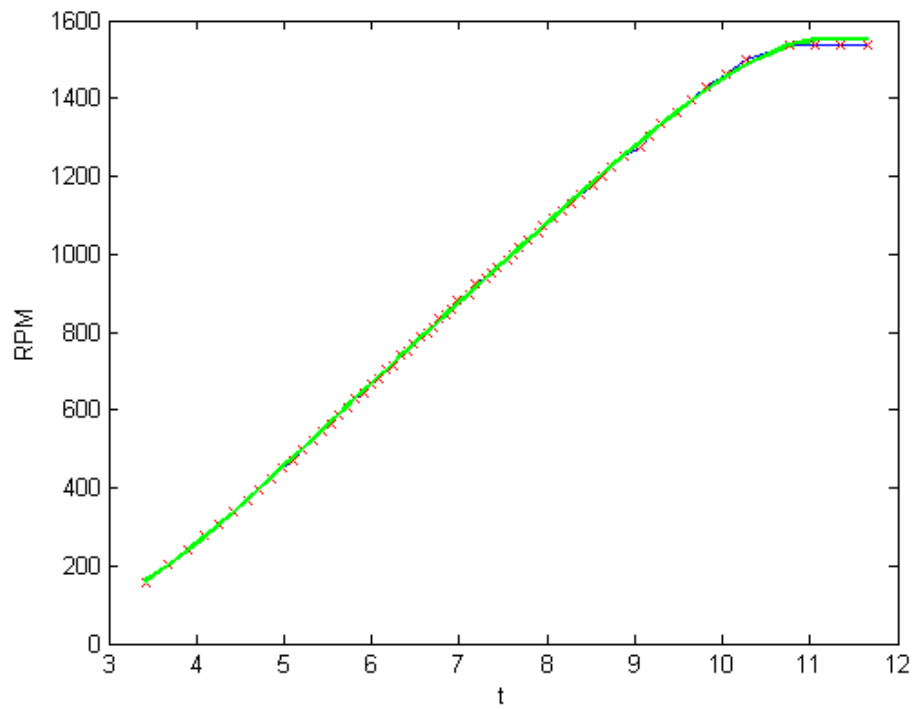


Fig.4.30.- Aproximación por mínimos cuadrados mediante un polinomio de grado 5, de los datos de velocidad.

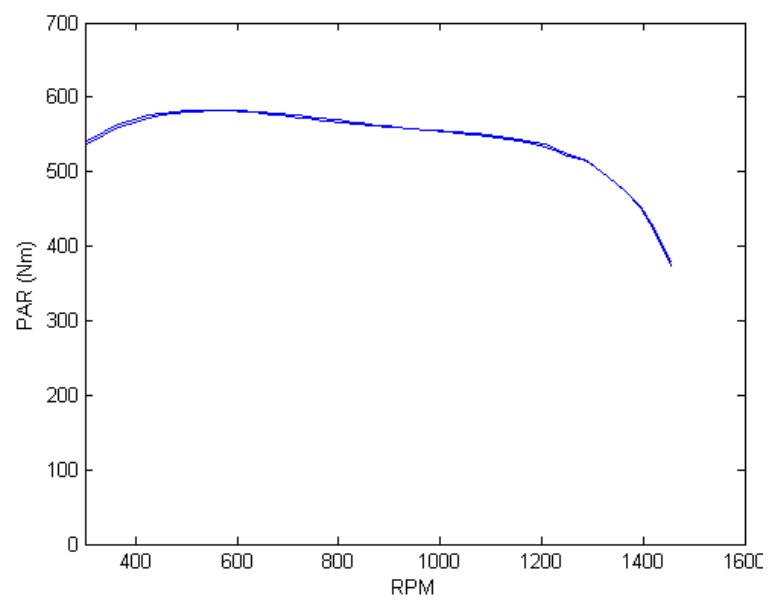


Fig.4.31.- Curvas de par obtenidas a partir de una aproximación por mínimos cuadrados de los datos de velocidad, empleando para ello polinomios de grado 5 y 6.

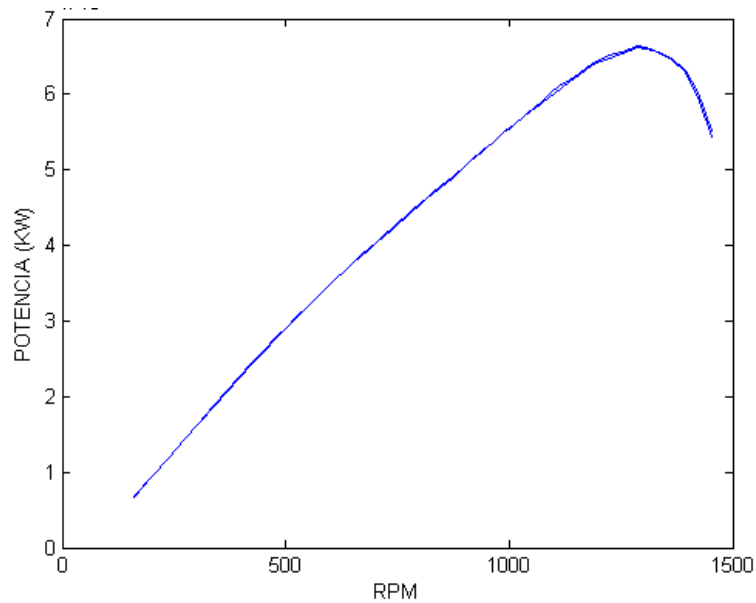


Fig.4.32.- Curvas de potencia obtenidas a partir de una aproximación por mínimos cuadrados de los datos de velocidad, empleando para ello polinomios de grado 5 y 6.

Dada por tanto la dificultad de encontrar un patrón de ajuste para todos los registros de velocidades obtenibles, se hace necesario un análisis de los datos asociado a cada ensayo. Este tendrá por objetivo determinar el polinomio de ajuste o los polinomios por tramos que mejor se adapten al perfil de velocidades obtenido. De esta forma, podremos estar seguros de que nos estamos adaptando a los datos del ensayo, lo que nos permitirá poder contrastar resultados de diferentes pruebas entre si.

Si bien las gráficas de par y potencias obtenidas no son más que un ejemplo correspondiente al motor eléctrico empleado para las pruebas, y sabiendo que la evolución de éstas dependen en gran medida de la tipología de motor empleado, la forma en que se realizó el ensayo de la Fig. 4.23 para simular una posible aceleración de un motor térmico real, entregó unos resultados muy similares a los de éstos, como puede apreciarse al comparar las Fig. 1.6 y Fig. 4.33.

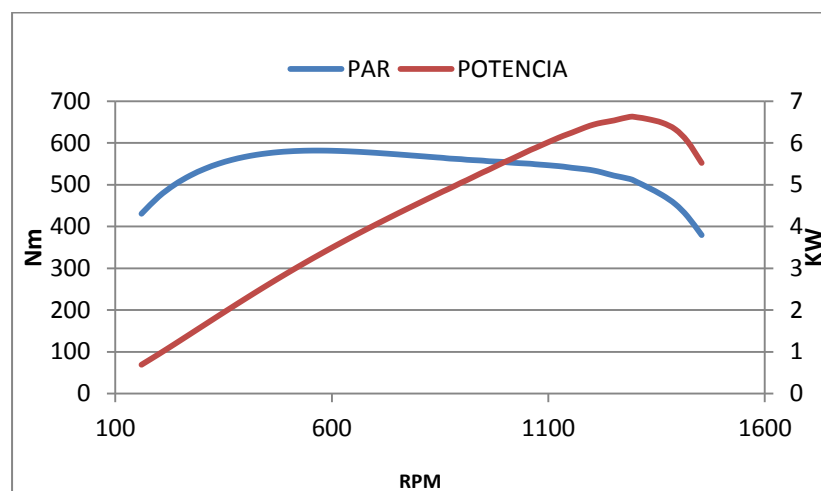


Fig.4.33.- Representación conjunta de la curva de par y potencia obtenidas en un ensayo tipo de aceleración hasta las 1500 rpm, empleando el motor eléctrico de prueba. Es clara la similitud con las curvas de par y potencia características de los motores de combustión.