

Capítulo 6

Medidas

6.1. Introducción

El prototipo del sistema 2D-LDA que hemos presentado se ha utilizado para realizar diferentes tipos de medidas de velocidad en dos situaciones muy distintas, para el caso de superficies rugosas en rotación (blancos sólidos) y para fluidos (agua) en un circuito cerrado, con el fin de comprobar cómo responde el anemómetro ante situaciones reales.

Vimos en el capítulo 2, que el sistema LDA permite realizar medidas de velocidad en cualquier tipo de blanco y en condiciones muy diversas, aunque estos dispositivos basados en la técnica diferencia Doppler están optimizados para situaciones de baja densidad de partículas, es decir en el caso de fluidos y/o gases. Es por tanto, un sistema de propósito general y gran flexibilidad.

El primer objetivo, antes de realizar ningún tipo de medida, es la calibración de todo el instrumento. Realizados los ajustes de los diferentes subsistemas, tanto de la parte óptica como de la electrónica y de la de adquisición y estimación frecuencial, mediante generadores de señal, analizadores de espectros y osciloscopios, se hace evidente la necesidad de disponer de algún sistema de referencia que nos permita dar por buenas las medidas del sistema 2D-LDA, es decir algún otro instrumento que nos proporcione una medida de referencia sobre la que comparar las medidas realizadas por el anemómetro y que nos permita decidir sobre la corrección de éstas y detectar posibles errores de diseño.

Lógicamente, disponer de un sistema capaz de generar medidas de la velocidad de fluidos con una resolución espacial muy pequeña y una precisión parecida al desarrollado en esta tesis, supondría disponer de otro instrumento LDA, lo que no está a nuestro alcance.

Por ello, las primeras medidas que hemos realizado son para el caso de la superficie de un blanco sólido de laboratorio, formado por un disco de PVC conectado a un pequeño motor. En este caso nos va a ser de gran utilidad. Como el comportamiento del prototipo diseñado es el mismo que para un fluido, con la diferencia que en el primer caso al disponer de un objeto rugoso en un entorno totalmente controlado por un motor que se encargará de generar el movimiento del blanco, podremos no solo verificar que el sistema funciona correctamente sino que además podremos ajustar la velocidad del blanco (a partir de la tensión del motor) para asegurarnos de que el sistema 2D-LDA funciona correctamente para el caso de detección de fluidos, en todo el margen de velocidades del prototipo.

Posteriormente, presentaremos algunas medidas en función de diferentes parámetros de diseño, como el número de muestras de la señal Doppler, velocidades o frecuencias, para comprobar sus prestaciones.

Para finalizar, una vez realizadas las medidas de la velocidad de un blanco sólido, y por tanto comprobado que se cumple con las especificaciones señaladas para el prototipo, realizaremos la medida de la velocidad de agua en un circuito cerrado formado por un recipiente y una pequeña bomba (utilizada para filtrar el agua de peceras) que se encarga de hacer circular el agua del recipiente a través de un conducto de plástico. En el punto intermedio de su recorrido, el tubo de goma pasa a través de un manguito de PVC que dispone en sus dos caras laterales metacrilato transparente, a través del cual se hacen incidir los tres haces de luz del anemómetro en un punto interior del fluido. Como hemos visto en el apartado 2.4, para maximizar la intensidad dispersada, el agua ha sido mezclada con partículas de sembrado comerciales.

6.2. Blanco sólido en rotación

El conjunto está formado por un disco de PVC, encajado en el eje de rotación de un motor de pequeñas dimensiones, de diámetro 90mm y de 6mm de anchura.

El motor utilizado se alimenta a 220VAC y puede generar velocidades angulares de hasta 2.800 r.p.m (revoluciones por minuto), sin necesidad de utilizar un fuente de alimentación externa exclusivamente para el motor. Para controlar la velocidad de rotación del motor dispone de un circuito regulador de velocidad para motores AC. La carcasa del motor va atornillada a una placa metálica como sujeción y para disipar el calor producido cuando el motor gira a velocidades pequeñas.

Considerando la velocidad de rotación del motor ω_d y las dimensiones del disco (diámetro D_d), podemos determinar cual será la velocidad lineal máxima de la superficie

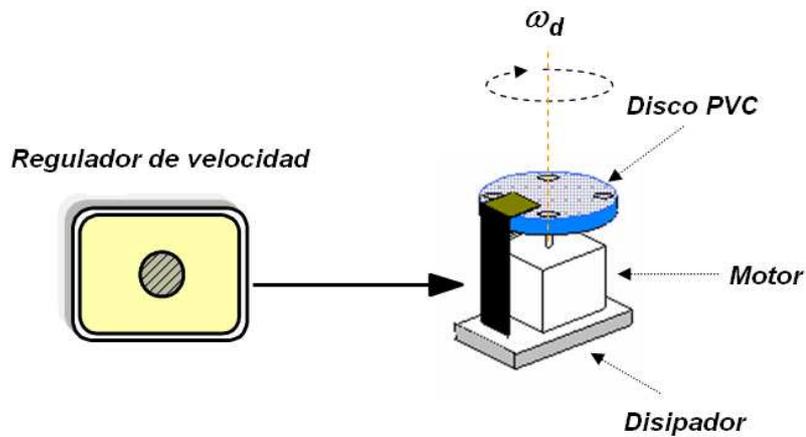


Figura 6.1 Esquema del blanco rotario

lateral del disco

$$V_{d_{max}} = \omega_d \cdot D_d/2 = 13,19 \text{ m/s} = 47,48 \text{ km/h} \quad (6.1)$$

6.2.1. Regulador de velocidad del motor

El circuito utilizado (Universal AC Motor Control de Velleman) está especialmente diseñado para regular la velocidad de motores AC.

Algunas de las ventajas que presenta el regulador son:

- El regulador lleva incorporado un circuito antiparásitos que evita interferencias de RF.
- Protección de picos de tensión inducidos por el motor.
- Alimentación a la tensión de red (220VAC o 125VAC).
- Alimentación carga de 24VAC hasta 240VAC.
- Alimentaciones red y carga aisladas galvánicamente.
- Potencia máxima de regulación del 5 % al 95 %.
- Ajuste independiente de la velocidad.

El margen de regulación nos limita el margen de velocidades de giro de 140 a 2.660 r.p.m, es decir, para unas velocidades lineales del disco disponibles de 0,66 m/s hasta

12,53m/s. Para ajustar un poco el margen al que realmente nos interesa (hasta 3m/s), se han realizado ciertas modificaciones en el circuito, substituyendo el potenciómetro regulador de la velocidad por uno de menor valor, juntamente con una resistencia en serie.

6.2.2. Calibración de la velocidad del disco

Ya que no disponemos de otro sistema LDA que nos permita obtener una medida de referencia, se ha realizado en la parte mas externa de la superficie del blanco giratorio cuatro agujeros circulares y equidistantes de 10mm de diámetro cada uno de ellos (figura 6.2). Perpendicularmente a ellos se ha colocado un LED transmisor y un fotodiodo enfrentados a ambos lados del disco. Mediremos la señal captada por el fotodiodo du-

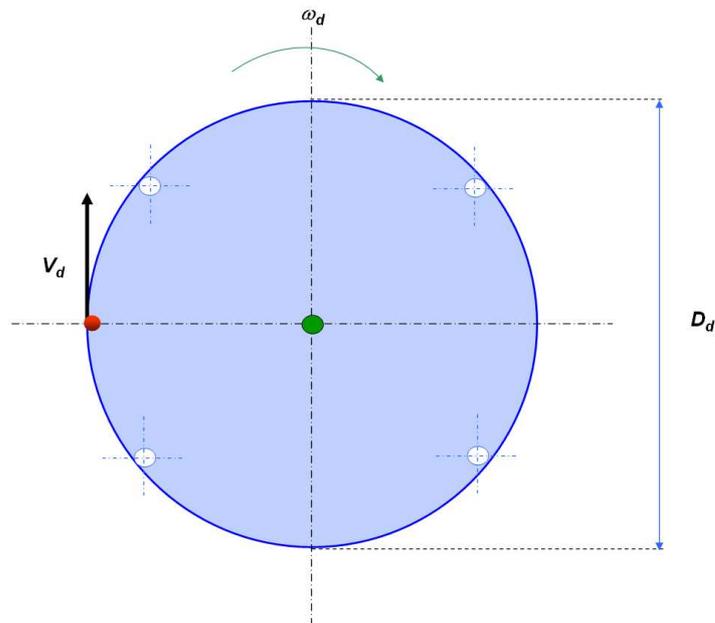


Figura 6.2 Ranurado del disco para la calibración de la velocidad del blanco

rante el giro del disco, de modo que obtendremos una serie de pulsos cuya separación temporal se relaciona directamente con la velocidad de rotación.

De esta manera podremos conocer aproximadamente a que velocidad gira el blanco y podremos ajustar la tensión de giro del motor para calibrar el sistema.

Si consideramos que la velocidad lineal máxima del disco tiene que ser de $V_d = 3$ m/s, vamos a determinar cuál ha de ser la velocidad o frecuencia de rotación del blanco.

$$\omega_d = \frac{2V_d}{D_d} = \frac{2 \cdot 3 \text{ m/s}}{90 \cdot 10^{-3} \text{ m}} = 66,66 \text{ rad/s} \quad (6.2)$$

$$f_d = \frac{\omega_d}{2\pi} = 10,61 \text{ Hz} \quad (6.3)$$

Si ahora tenemos en cuenta que cada vuelta del disco se generan cuatro pulsos, la frecuencia o pulsación de la señal a la salida del detector, f_{do} y ω_{do} , presenta un valor cuatro veces más grande que la calculada anteriormente, f_d y ω_d , de donde

$$\omega_{do} = 4 \cdot \omega_d = 266,67 \text{ rad/s} \quad (6.4)$$

$$f_{do} = 4 \cdot f_d = 42,44 \text{ Hz} \quad (6.5)$$

Cuadro 6.1 Relación entre la velocidad lineal del blanco sólido en rotación y las frecuencia y pulsaciones obtenidas por el sistema de calibración

V_d (m/s)	ω_d (rad/s)	f_d (Hz)	ω_{do} (rad/s)	f_{do} (Hz)
3.0	66.66	10.61	266.67	42.44
2.5	55.55	8.84	222.22	35.36
2.0	44.44	7.07	177.77	28.29
1.5	33.33	5.30	133.33	21.22
1.0	22.22	3.53	88.88	14.14
0.5	11.11	1.76	44.44	7.07

En el cuadro 6.1 calculamos para diferentes velocidades lineales del disco, las frecuencias y pulsaciones del blanco sólido en rotación que deberemos obtener, ajustando la tensión del regulador de velocidad, a la salida del sistema de calibración de ranuras.

6.2.3. Espectro señal Doppler real

La primera medida real del espectro de la señal Doppler del blanco rotatorio la presentamos en la figura 6.3. Podemos observar que, tal como mostraba el espectro teórico en la figura 4.14, se trata de un espectro formado por dos picos frecuenciales, f_1 y f_2 , proporcionales a las dos componentes de la velocidad del blanco, V_1 y V_2 , respectivamente.

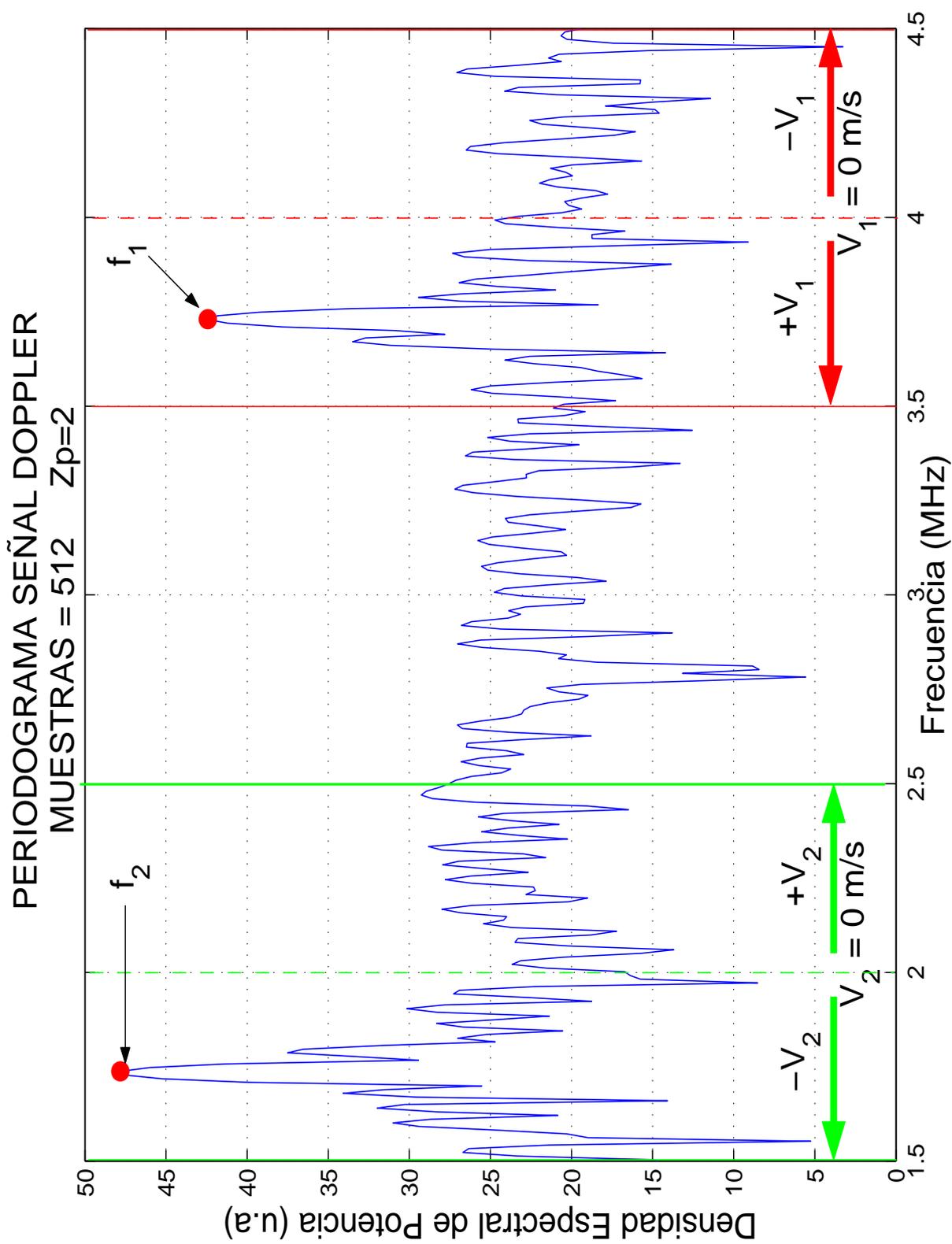


Figura 6.3 Espectro de la señal Doppler real

Cada una de las componentes frecuenciales está siempre en un margen espectral diferente para imposibilitar cualquier fenómeno de solapamiento. La V_2 estará entre 1.5MHz y 2.5MHz, y la V_1 entre 3.5MHz y 4.5MHz, centradas a las frecuencias de 2MHz y 4MHz (velocidad nula).

6.2.4. Medidas a diferentes velocidades

Para medir la velocidad del blanco rotatorio presentado anteriormente, en el margen de $\pm 3m/s$ para las dos componentes de velocidad, necesitaríamos ajustar la velocidad de rotación tantas veces como diferentes velocidades queramos medir, mediante el circuito regulador de velocidad, a partir del ajuste de la tensión de control que dispone y calibrando cada vez mediante el método de ajuste presentado en el apartado 6.2.2. Además, como el prototipo permite discriminar el sentido o signo de la velocidad, tendríamos que invertir el sentido del movimiento del blanco para poder comprobar el comportamiento del disco en ambos sentidos de rotación. Eso significaría complicar el proceso de medida ya que, cada vez que quisiéramos variar la velocidad, supondría realizar otro vez una calibración de la velocidad de rotación del disco.

Para realizar las medidas sin necesidad de calibrar cada vez la velocidad del blanco, el disco lo pondremos en posición vertical. De esta manera, sólo ajustando la velocidad de rotación del disco en la parte más externa del blanco (a la velocidad máxima), sabiendo que la velocidad lineal (la componente tangencial) en un movimiento circular varía en función del tamaño del disco, permitirá realizar medidas en todo el rango de velocidades solo cambiando el punto de medida a lo largo de su diámetro. Y por añadidura, con la ventaja que las medidas en puntos a la izquierda o derecha del centro, tendrán signo contrario.

Así podemos caracterizar en todo el margen de velocidades el blanco rotario con una única calibración, minimizando los errores y consiguiendo una mayor exactitud en todas las medidas.

En la figura 6.5, podemos observar las componentes de velocidad detectadas para el caso de realizar medidas en un punto a la izquierda del centro del disco P_A y un punto a la derecha P_B . Lógicamente el punto P_A la velocidad lineal del disco tendrá sólo componente X y será positiva $V_d > 0$, con la componente $V_{1A} > 0$ y $V_{2A} < 0$, mientras que en el punto P_B la componente X del movimiento del disco será negativo $V_d < 0$ con la componente $V_{1B} < 0$ y $V_{2B} > 0$.

Si queremos que todo el margen de velocidades de las dos componentes V_1 y V_2

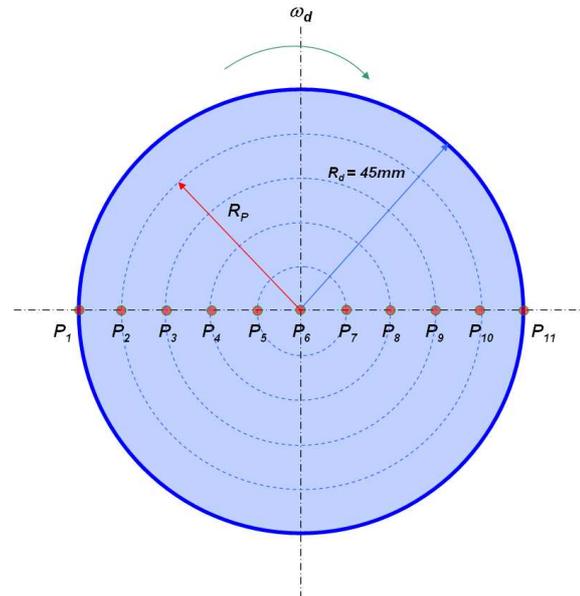


Figura 6.4 Puntos de medida del blanco rotatorio

varíen de ± 3 m/s, la velocidad lineal en el punto más externo (la velocidad del motor), aplicando las ecuaciones (4.51) y (4.52), es

$$V_d = 2\sqrt{3} = 3,4641\text{m/s} \quad (6.6)$$

y la velocidad angular

$$\omega_d = 76,98\text{rad/s} \quad (6.7)$$

Así para una velocidad lineal de rotación del disco en la parte más externa de 3.4641 m/s, las componentes en ese punto son:

- Punto P_A si $R_d = 45\text{mm}$:
 $\rightarrow V_{1A} = +3\text{m/s} \Rightarrow f_1 = 3,5\text{MHz} \Rightarrow V_{2A} = -3\text{m/s} \Rightarrow f_2 = 1,5\text{MHz}$
- Punto P_B si $R_d = 45\text{mm}$:
 $\rightarrow V_{1B} = -3\text{m/s} \Rightarrow f_1 = 4,5\text{MHz} \Rightarrow V_{2B} = +3\text{m/s} \Rightarrow f_2 = 2,5\text{MHz}$

Para conocer en todo los puntos de medida del blanco rotatorio (figura 6.4) cuál es el valor de las dos componentes de velocidad y frecuencias presentamos los cálculos en el cuadro 6.2.

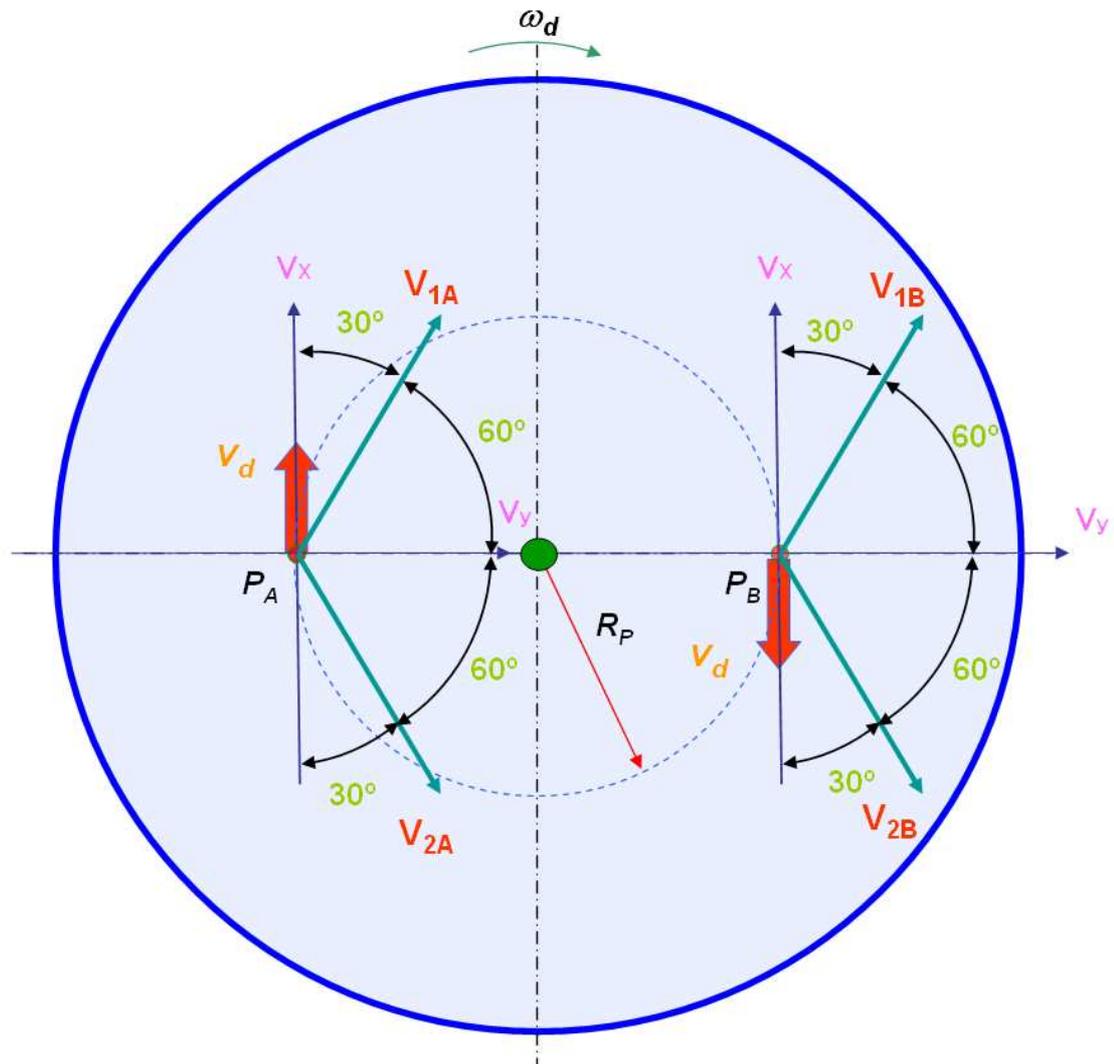


Figura 6.5 Componentes de velocidad definidos en puntos a la izquierda y derecha del eje de rotación del blanco rotatorio

6.2.5. Efecto del número de muestras

Las primeras medida que presentamos están relacionadas con qué número de muestras necesitamos obtener para conseguir que el error relativo en la medida de la velocidad (frecuencia).

En la teoría del diseño realizado en el apartado 4.6, vimos que el número de muestras que debíamos utilizar en la estimación de la frecuencia Doppler (la del batido) era de 512 muestras, para obtener un error relativo de las dos componentes de velocidad por debajo del 1%, en el caso que el nivel de ruido no nos enmascare la señal Doppler.

Ahora bien, si utilizamos otras técnicas que permitan mejorar la resolución frecuen-

Cuadro 6.2 Relación entre las componentes de velocidad V_1 y V_2 , las frecuencias asociadas y la posición de los diferentes puntos de medida del blanco solido en rotación

	V_2 (m/s)	V_1 (m/s)	f_2 (MHz)	f_1 (MHz)	R_p (mm)	D_p (mm)
P ₁	-3.0	+3.0	1.5	3.5	45	90
P ₂	-2.42	+2.42	1.6	3.6	36.3	72.6
P ₃	-1.81	+1.81	1.7	3.7	27.15	54.3
P ₄	-1.21	+1.21	1.8	3.8	18.15	36.3
P ₅	-0.60	+0.60	1.9	3.9	9	18
P ₆	0	0	2	4	0	0
P ₇	+0.60	-0.60	2.1	4.1	9	18
P ₈	+1.21	-1.21	2.2	4.2	18.15	36.3
P ₉	+1.81	-1.81	2.3	4.3	27.15	54.3
P ₁₀	+2.42	-2.42	2.4	4.4	36.3	72.6
P ₁₁	+3.0	-3.0	2.5	4.5	45	90

cial del espectro de la señal Doppler, como la técnica *zero-padding* y la interpolación gaussiana vistas en el apartado 4.7, podremos mejorar la detección del máximo.

Para observar cómo evoluciona la resolución espectral para la detección de los dos picos espectrales, vamos a realizar a partir de datos reales, 1000 medidas del máximo del espectro de la señal Doppler para el caso que el blanco sólido rotatorio esté parado ($V_1 = 0$ y $V_2 = 0$) generando picos de frecuencia $f_1=2\text{MHz}$ y $f_2=4\text{MHz}$, y en el caso de velocidad máxima ($V_1=+3\text{m/s}$ y $V_2=-3\text{m/s}$) con picos frecuenciales a $f_1=3.5\text{MHz}$ y $f_2=1.5\text{MHz}$, para diferentes número de muestras ($N_m = 64, 128, 256$ y 512), y en diferentes grados de *zero-padding* ($n_{zp}=0, 1$ y 2). También presentamos para cada caso, el espectro de una de las 1000 medidas para corroborar la resolución y precisión de las medidas y el error cometido.

► $V_1 = 0$ y $V_2 = 0$ \implies : figuras 6.6- 6.41

En este caso el blanco está parado, y por tanto las frecuencias de los batidos estarán centradas a la frecuencias de 2MHz y 4 MHz para las componentes de velocidad V_2 y V_1 respectivamente. Hemos realizado esta medida, no solo para ajustar y comprobar que el subsistema electrónico (SEL) está totalmente calibrado, sino para conocer que error produce el sistema sin movimiento del blanco.

Además del error producido por el ruido inmerso en el SEL en la señal Doppler y por la placa de adquisición, aparecen errores producidos por el enventanado de los datos (FFT), variaciones o inestabilidades frecuenciales de los osciladores de los circuitos del prototipo, y por el error de cuantificación del proceso de digitalización de la placa o tarjeta de adquisición de datos utilizada. Hemos creído oportuno que realizar medidas de la señal para este caso, blanco en reposo, nos permite obtener aquellos errores que no dependen del movimiento y características del propio blanco.

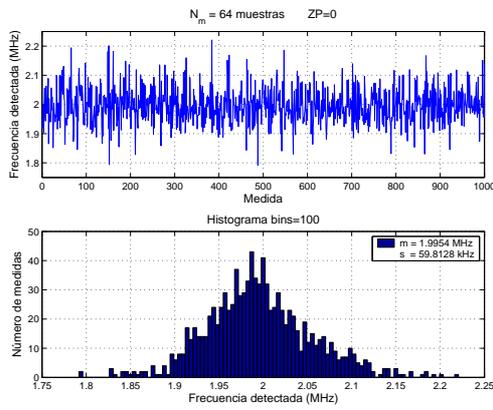


Figura 6.6 Medidas de la velocidad $V_2 = 0$ con $N_m = 64$ y $n_{zp} = 0$

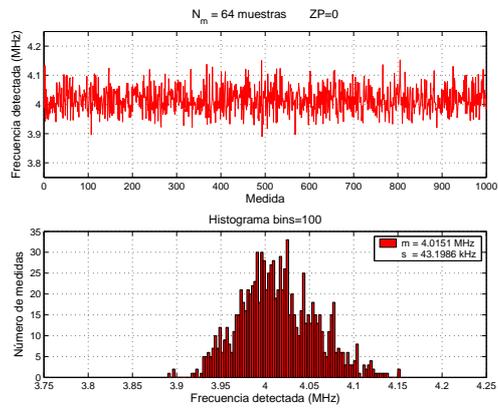


Figura 6.9 Medidas de la velocidad $V_1 = 0$ con $N_m = 64$ y $n_{zp} = 0$

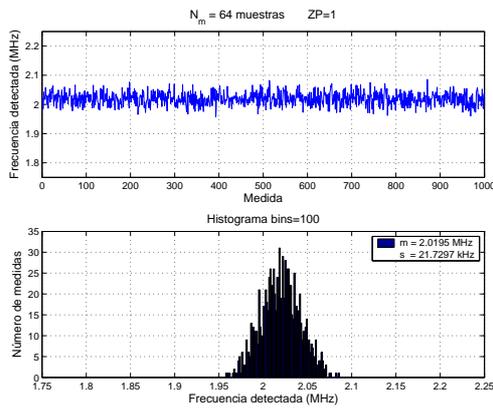


Figura 6.7 Medidas de la velocidad $V_2 = 0$ con $N_m = 64$ y $n_{zp} = 1$

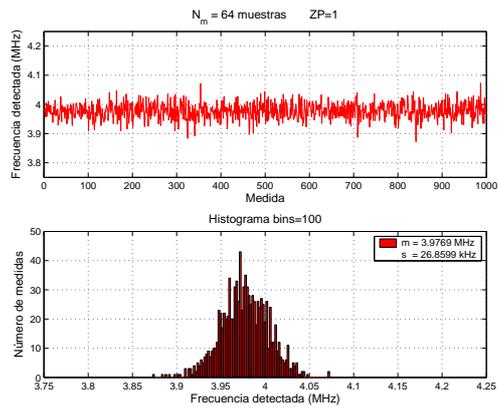


Figura 6.10 Medidas de la velocidad $V_1 = 0$ con $N_m = 64$ y $n_{zp} = 1$

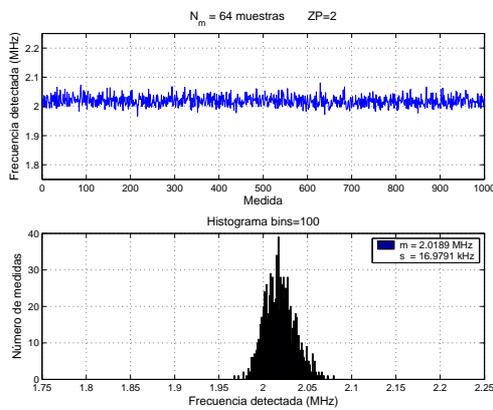


Figura 6.8 Medidas de la velocidad $V_2 = 0$ con $N_m = 64$ y $n_{zp} = 2$

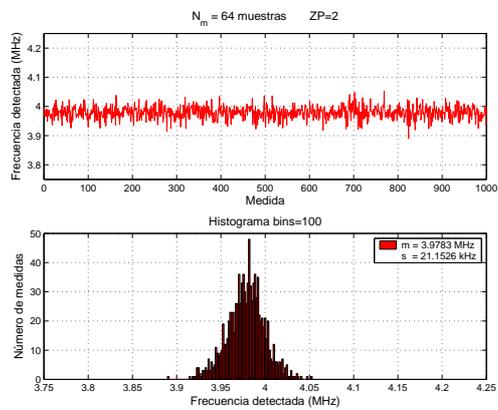


Figura 6.11 Medidas de la velocidad $V_1 = 0$ con $N_m = 64$ y $n_{zp} = 2$

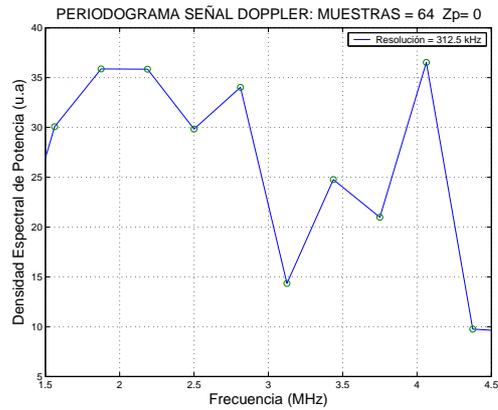


Figura 6.12 Espectro de la señal Doppler con 64 muestras y zero-padding $n_{zp} = 0$ ($V_1 = V_2 = 0$)

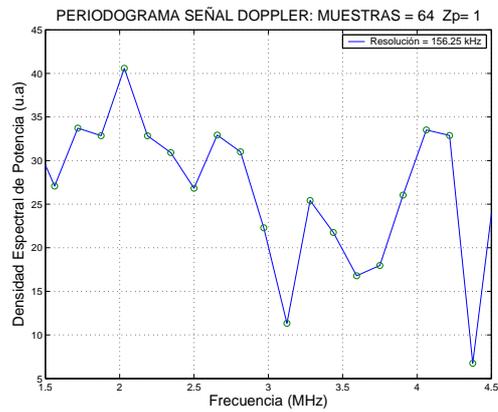


Figura 6.13 Espectro de la señal Doppler con 64 muestras y zero-padding $n_{zp} = 1$ ($V_1 = V_2 = 0$)

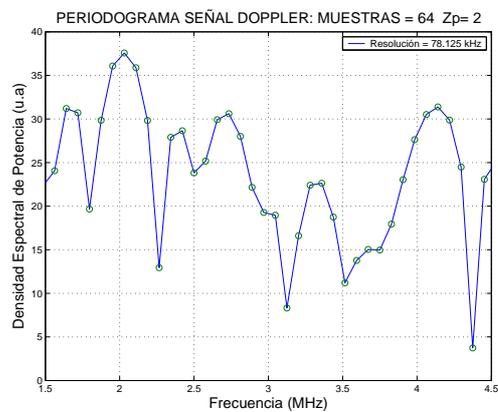


Figura 6.14 Espectro de la señal Doppler con 64 muestras y zero-padding $n_{zp} = 2$ ($V_1 = V_2 = 0$)

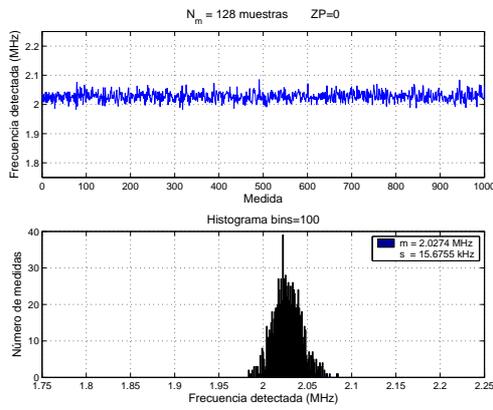


Figura 6.15 Medidas de la velocidad $V_2 = 0$ con $N_m = 128$ y $n_{zp} = 0$

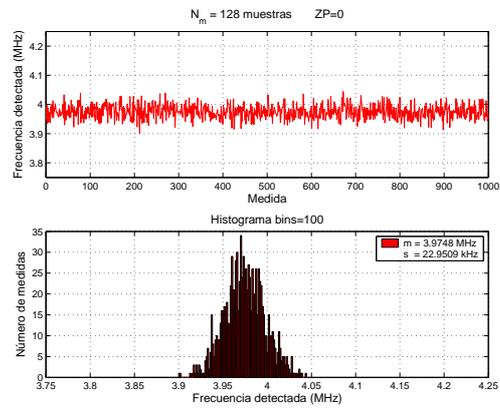


Figura 6.18 Medidas de la velocidad $V_1 = 0$ con $N_m = 128$ y $n_{zp} = 0$

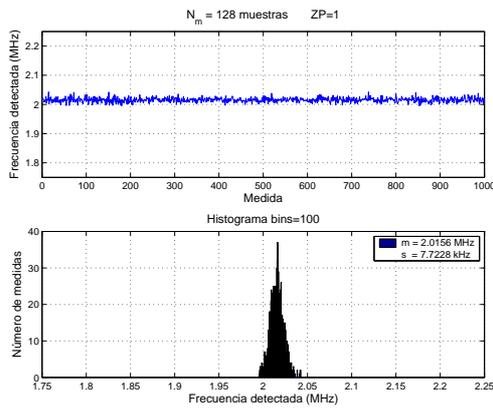


Figura 6.16 Medidas de la velocidad $V_2 = 0$ con $N_m = 128$ y $n_{zp} = 1$

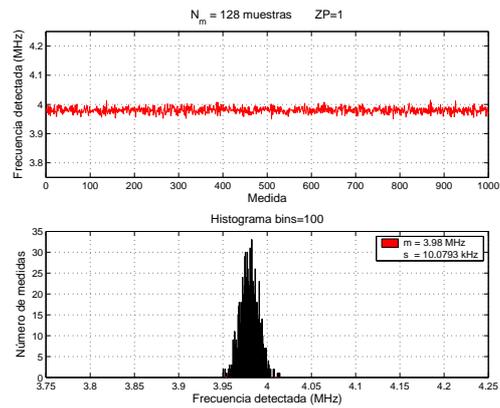


Figura 6.19 Medidas de la velocidad $V_1 = 0$ con $N_m = 128$ y $n_{zp} = 1$

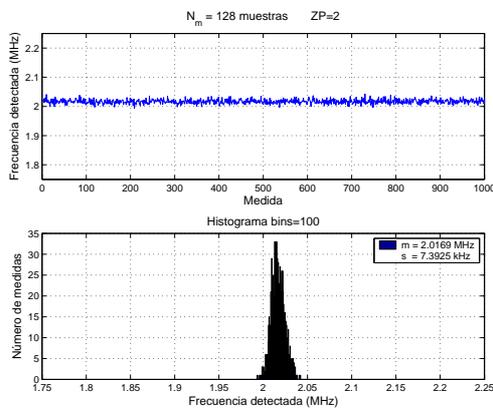


Figura 6.17 Medidas de la velocidad $V_2 = 0$ con $N_m = 128$ y $n_{zp} = 2$

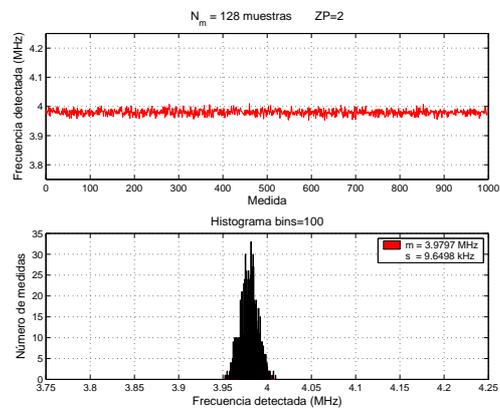


Figura 6.20 Medidas de la velocidad $V_1 = 0$ con $N_m = 128$ y $n_{zp} = 2$

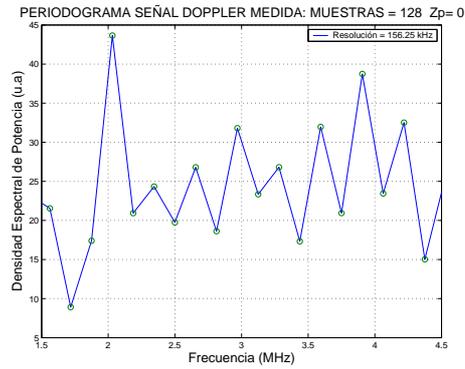


Figura 6.21 Espectro de la señal Doppler con 128 muestras y zero-padding $n_{zp} = 0$ ($V_1 = V_2 = 0$)

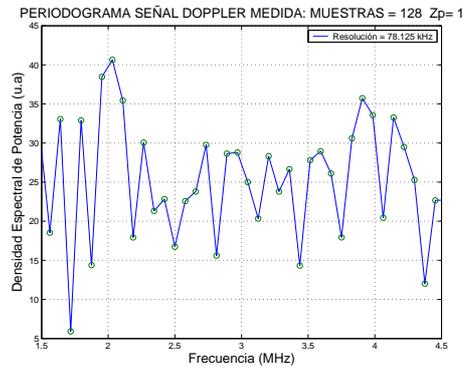


Figura 6.22 Espectro de la señal Doppler con 128 muestras y zero-padding $n_{zp} = 1$ ($V_1 = V_2 = 0$)

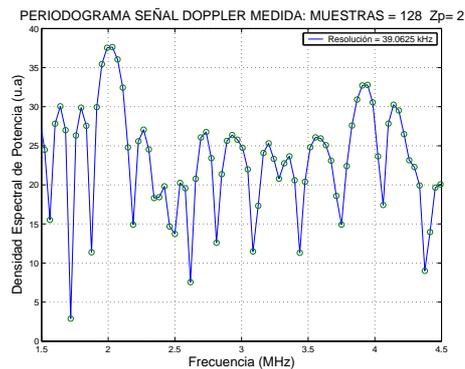


Figura 6.23 Espectro de la señal Doppler con 128 muestras y zero-padding $n_{zp} = 2$ ($V_1 = V_2 = 0$)

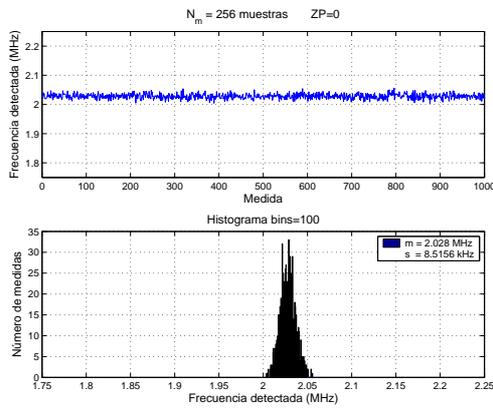


Figura 6.24 Medidas de la velocidad $V_2 = 0$ con $N_m = 256$ y $n_{zp} = 0$

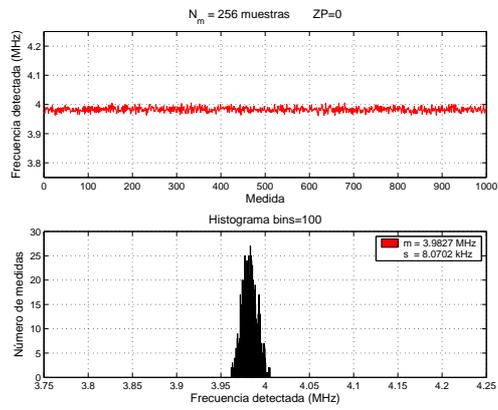


Figura 6.27 Medidas de la velocidad $V_1 = 0$ con $N_m = 256$ y $n_{zp} = 0$

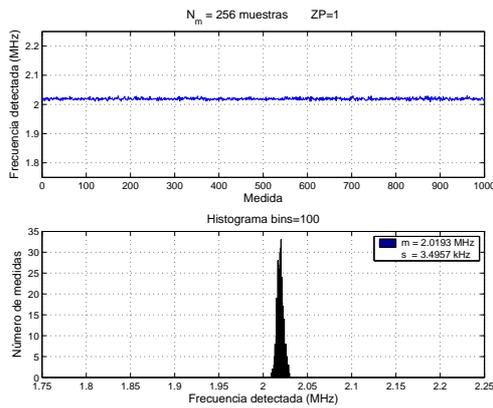


Figura 6.25 Medidas de la velocidad $V_2 = 0$ con $N_m = 256$ y $n_{zp} = 1$

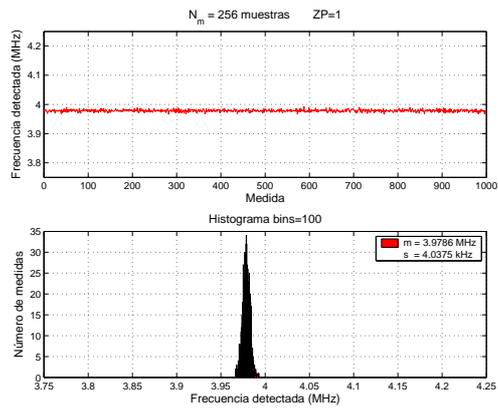


Figura 6.28 Medidas de la velocidad $V_1 = 0$ con $N_m = 256$ y $n_{zp} = 1$

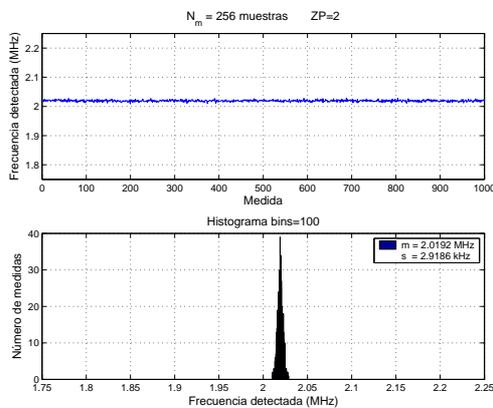


Figura 6.26 Medidas de la velocidad $V_2 = 0$ con $N_m = 256$ y $n_{zp} = 2$

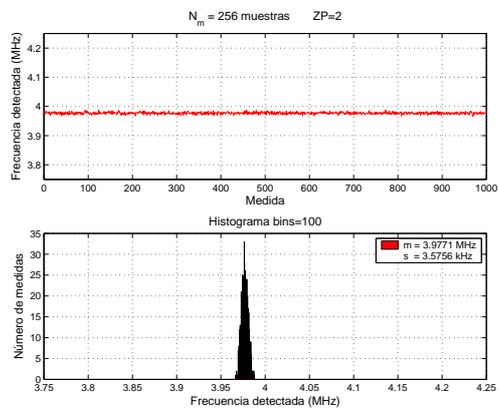


Figura 6.29 Medidas de la velocidad $V_1 = 0$ con $N_m = 256$ y $n_{zp} = 2$

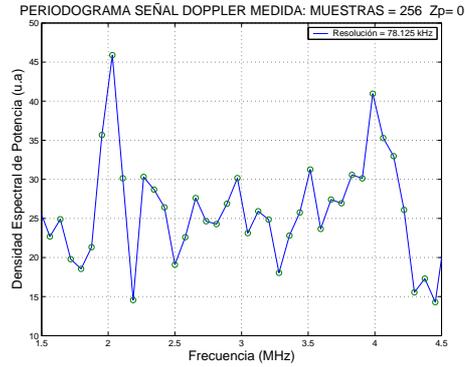


Figura 6.30 Espectro de la señal Doppler con 256 muestras y zero-padding $n_{zp} = 0$ ($V_1 = V_2 = 0$)

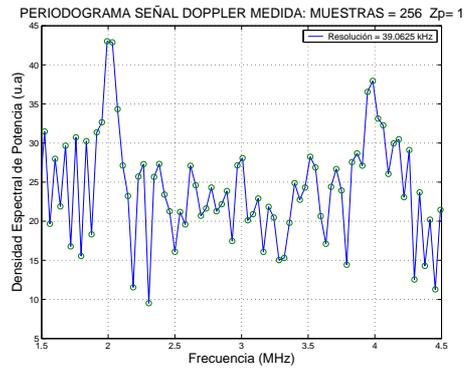


Figura 6.31 Espectro de la señal Doppler con 256 muestras y zero-padding $n_{zp} = 1$ ($V_1 = V_2 = 0$)

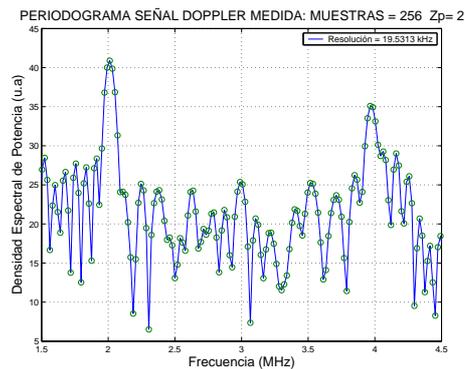


Figura 6.32 Espectro de la señal Doppler con 256 muestras y zero-padding $n_{zp} = 2$ ($V_1 = V_2 = 0$)

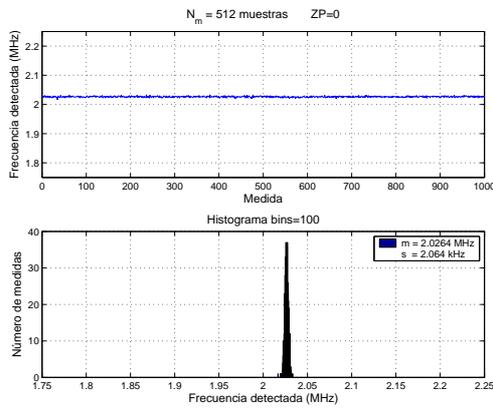


Figura 6.33 Medidas de la velocidad $V_2 = 0$ con $N_m = 512$ y $n_{zp} = 0$

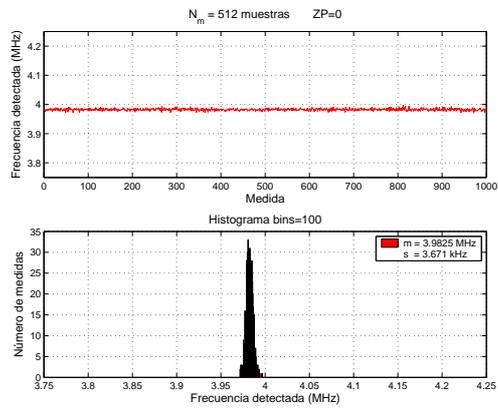


Figura 6.36 Medidas de la velocidad $V_1 = 0$ con $N_m = 512$ y $n_{zp} = 0$

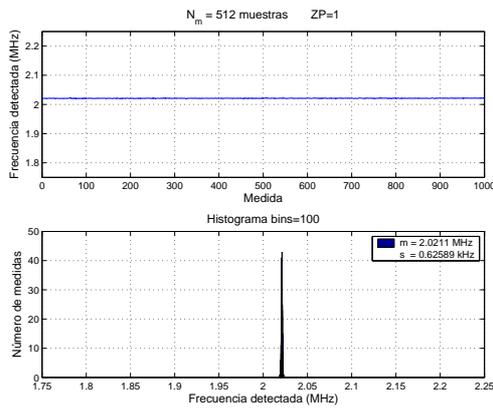


Figura 6.34 Medidas de la velocidad $V_2 = 0$ con $N_m = 512$ y $n_{zp} = 1$

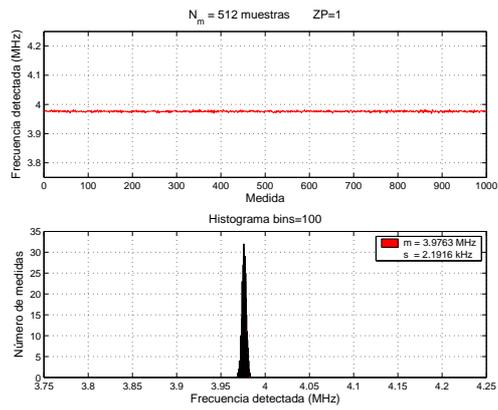


Figura 6.37 Medidas de la velocidad $V_1 = 0$ con $N_m = 512$ y $n_{zp} = 1$

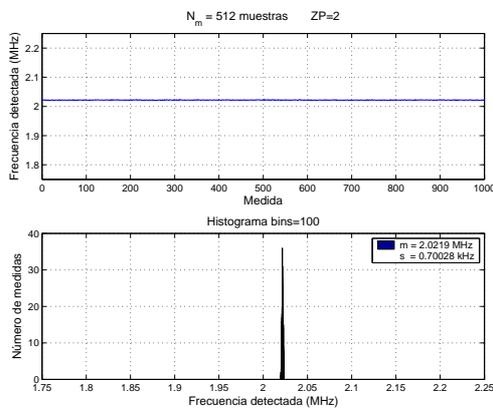


Figura 6.35 Medidas de la velocidad $V_2 = 0$ con $N_m = 512$ y $n_{zp} = 2$

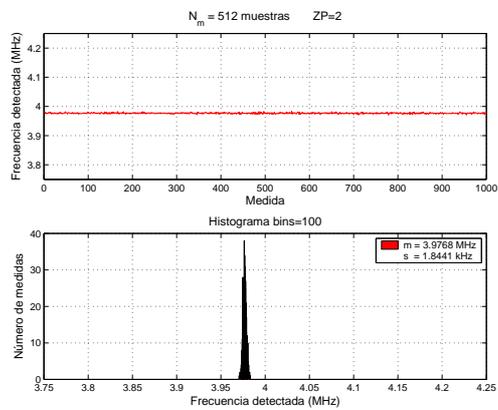


Figura 6.38 Medidas de la velocidad $V_1 = 0$ con $N_m = 512$ y $n_{zp} = 2$

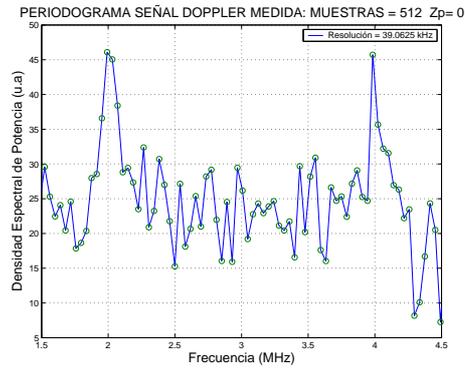


Figura 6.39 Espectro de la señal Doppler con 512 muestras y zero-padding $n_{zp} = 0$ ($V_1 = V_2 = 0$)

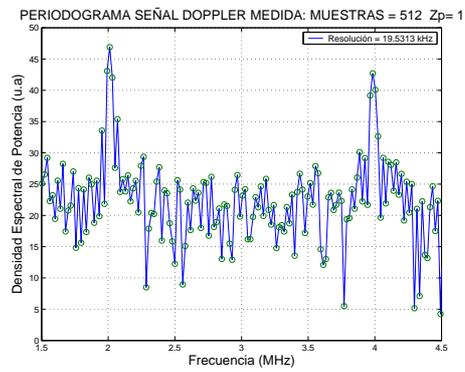


Figura 6.40 Espectro de la señal Doppler con 512 muestras y zero-padding $n_{zp} = 1$ ($V_1 = V_2 = 0$)

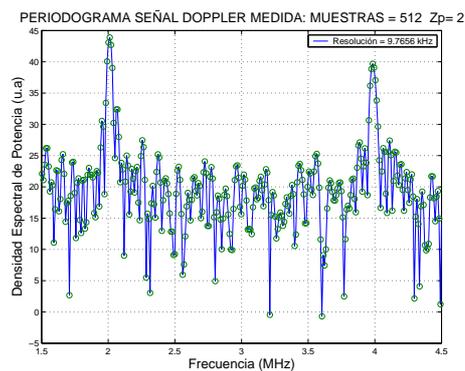


Figura 6.41 Espectro de la señal Doppler con 512 muestras y zero-padding $n_{zp} = 2$ ($V_1 = V_2 = 0$)

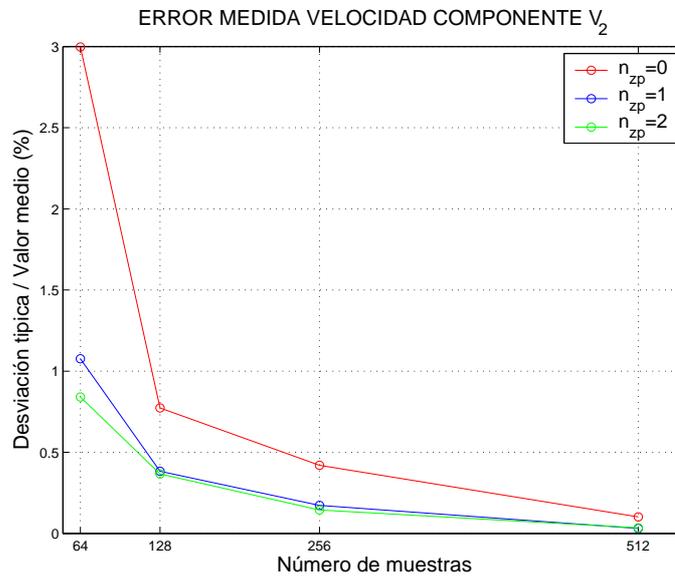


Figura 6.42 Error en % de la medida de la componente de velocidad V_2 de la señal Doppler con 64, 128, 256 y 512 muestras y zero-padding $n_{zp} = 0$, $n_{zp} = 1$ y $n_{zp} = 2$ ($V_2 = 0$)

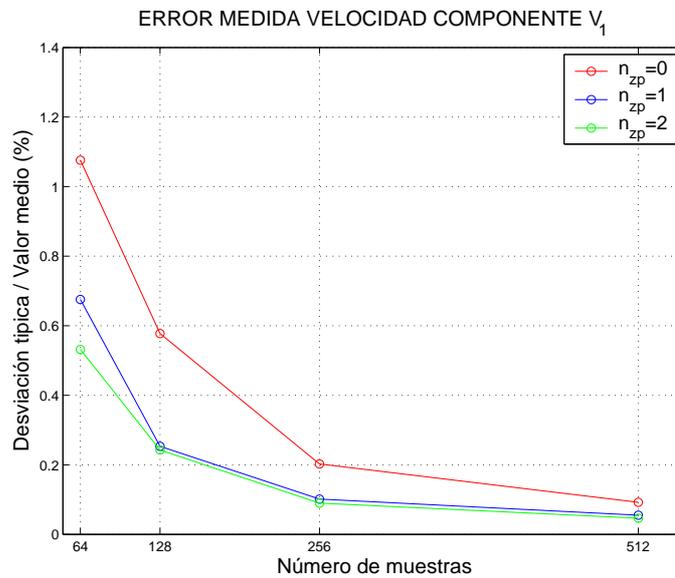


Figura 6.43 Error en % de la medida de la componente de velocidad V_1 de la señal Doppler con 64, 128, 256 y 512 muestras y zero-padding $n_{zp} = 0$, $n_{zp} = 1$ y $n_{zp} = 2$ ($V_1 = 0$)

► Velocidad máxima $V_1 = +3m/s$ y $V_2 = -3m/s$ \implies figuras 6.44- 6.79

En el caso de que la frecuencia del batido de la señal Doppler sea la más pequeña, 1.5MHz de la componente V_2 , vimos en el apartado 4.5 que coincidía con el máximo error relativo de la velocidad del blanco, por esta razón nos interesa comprobar si, en el caso real de obtener medidas con el anemómetro, cumplimos con la condición de tener un error máximo del 1%. Hemos repetido las medidas que hemos realizado anteriormente para esta situación.

Vemos claramente que la precisión de la medida de la velocidad, o de la frecuencia del batido Doppler de las dos componentes V_1 y V_2 , va disminuyendo cada vez que incrementamos el número de muestras y el orden del *zero-padding*. En el caso de capturar 512 muestras y $n_{zp}=2$, conseguimos un error relativo de la medida de la velocidad por debajo del 1%, cumpliendo con las expectativas en la teoría del diseño del prototipo del sistema 2D-LDA, presentadas en la figuras 6.81 y 6.80, en el caso de máxima velocidad, que será la situación más crítica.

Cabe destacar que el incremento del error relativo aparente de las medidas se debe también a las variaciones aleatorias de velocidad del blanco rotatorio, debido a las inestabilidades intrínsecas del giro del sistema motor-disco.

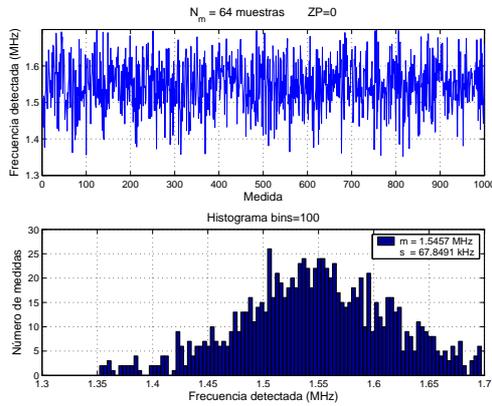


Figura 6.44 Medidas de la velocidad $V_2 = -3m/s$ con $N_m = 64$ y $n_{zp} = 0$

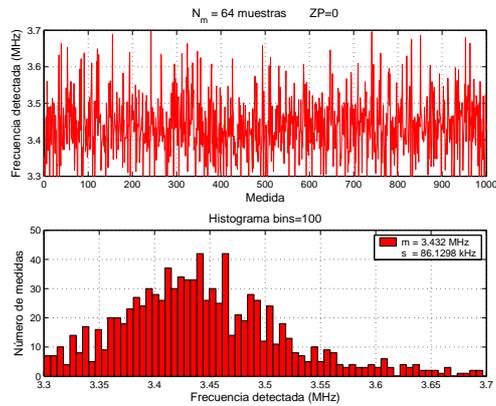


Figura 6.47 Medidas de la velocidad $V_1 = +3m/s$ con $N_m = 64$ y $n_{zp} = 0$

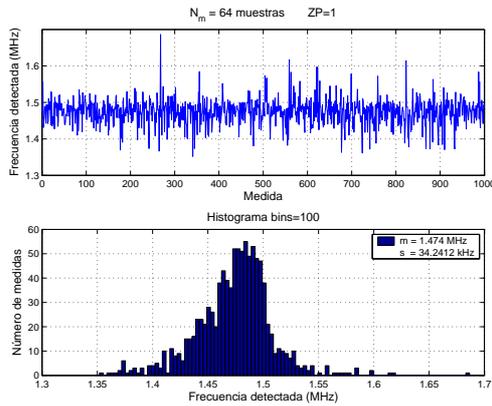


Figura 6.45 Medidas de la velocidad $V_2 = -3m/s$ con $N_m = 64$ y $n_{zp} = 1$

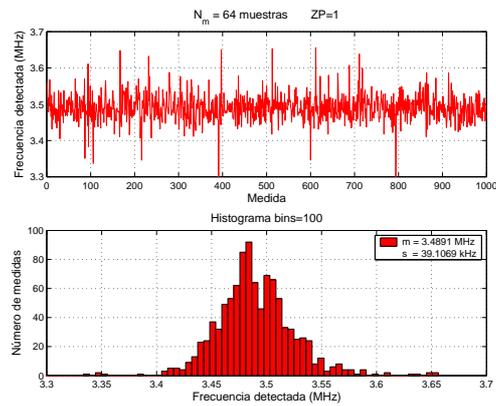


Figura 6.48 Medidas de la velocidad $V_1 = +3m/s$ con $N_m = 64$ y $n_{zp} = 1$

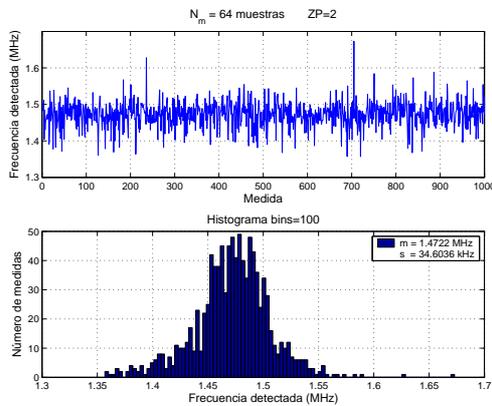


Figura 6.46 Medidas de la velocidad $V_2 = -3m/s$ con $N_m = 64$ y $n_{zp} = 2$

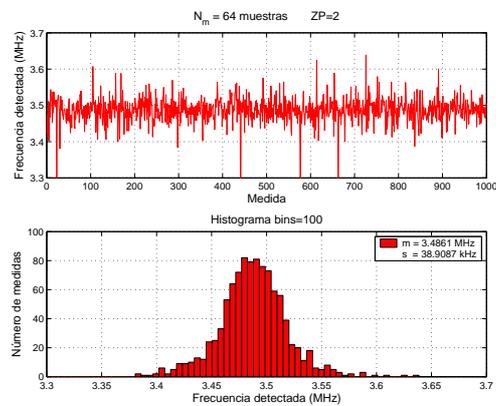


Figura 6.49 Medidas de la velocidad $V_1 = +3m/s$ con $N_m = 64$ y $n_{zp} = 2$

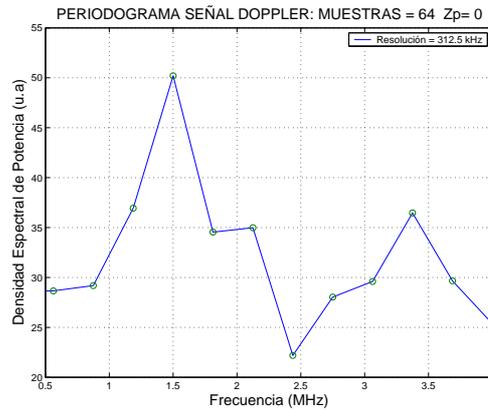


Figura 6.50 Espectro de la señal Doppler con 64 muestras y *zero-padding* $n_{zp} = 0$ ($V_1 = +3m/s$, $V_2 = -3m/s$)

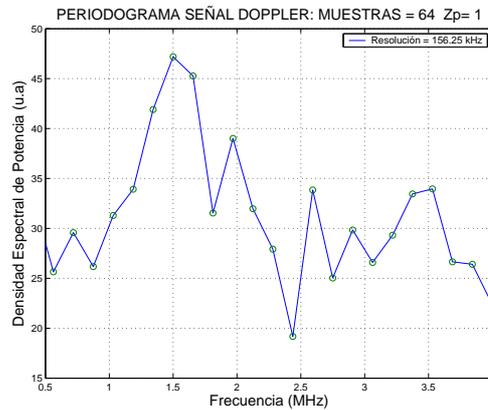


Figura 6.51 Espectro de la señal Doppler con 64 muestras y *zero-padding* $n_{zp} = 1$ ($V_1 = +3m/s$, $V_2 = -3m/s$)

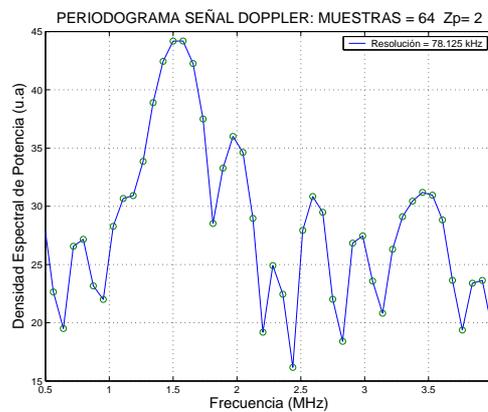


Figura 6.52 Espectro de la señal Doppler con 64 muestras y *zero-padding* $n_{zp} = 2$ ($V_1 = +3m/s$, $V_2 = -3m/s$)

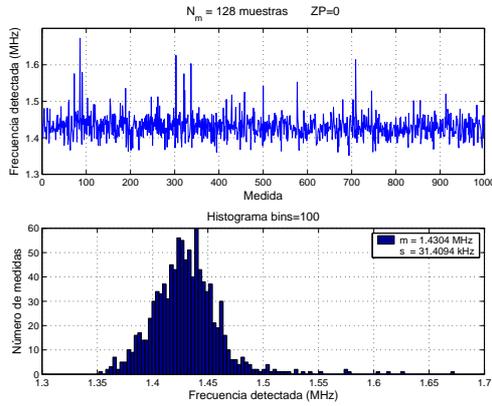


Figura 6.53 Medidas de la velocidad $V_2 = -3m/s$ con $N_m = 128$ y $n_{zp} = 0$

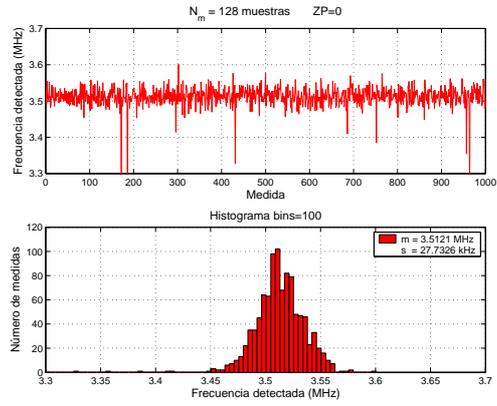


Figura 6.56 Medidas de la velocidad $V_1 = +3m/s$ con $N_m = 128$ y $n_{zp} = 0$

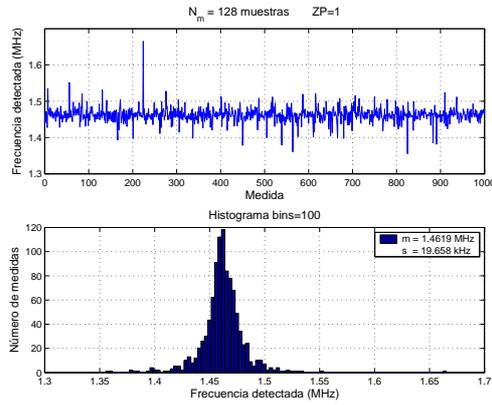


Figura 6.54 Medidas de la velocidad $V_2 = -3m/s$ con $N_m = 128$ y $n_{zp} = 1$

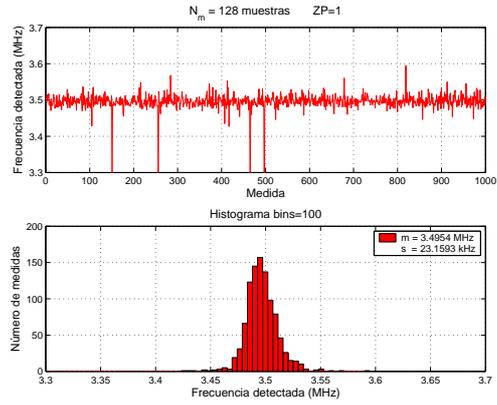


Figura 6.57 Medidas de la velocidad $V_1 = +3m/s$ con $N_m = 128$ y $n_{zp} = 1$

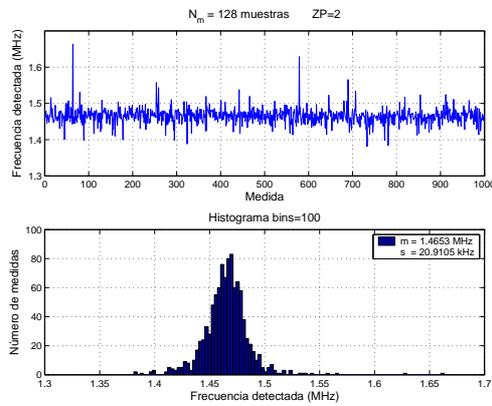


Figura 6.55 Medidas de la velocidad $V_2 = -3m/s$ con $N_m = 128$ y $n_{zp} = 2$

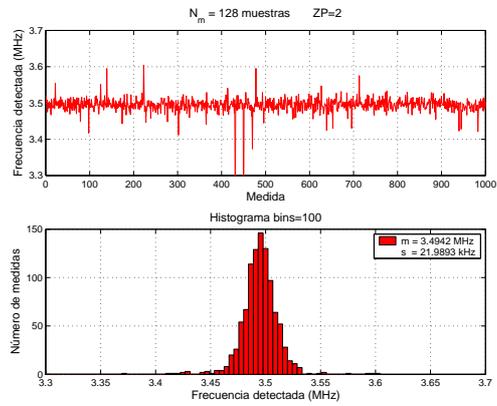


Figura 6.58 Medidas de la velocidad $V_1 = +3m/s$ con $N_m = 128$ y $n_{zp} = 2$

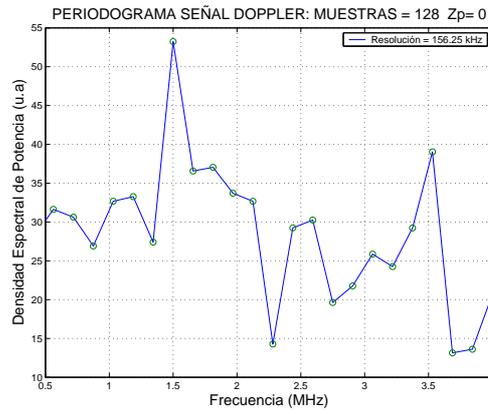


Figura 6.59 Espectro de la señal Doppler con 128 muestras y *zero-padding* $n_{zp} = 0$ ($V_1 = +3m/s$, $V_2 = -3m/s$)

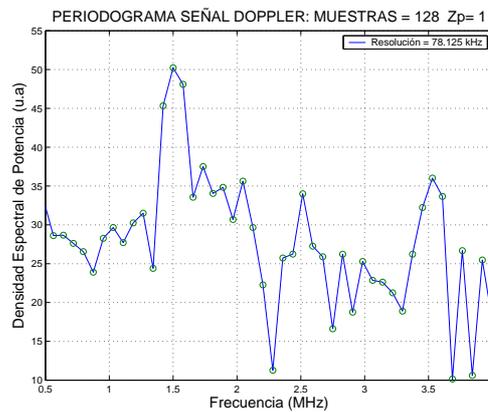


Figura 6.60 Espectro de la señal Doppler con 128 muestras y *zero-padding* $n_{zp} = 1$ ($V_1 = +3m/s$, $V_2 = -3m/s$)

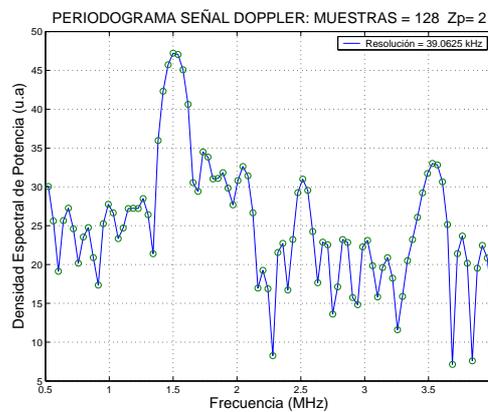


Figura 6.61 Espectro de la señal Doppler con 128 muestras y *zero-padding* $n_{zp} = 2$ ($V_1 = +3m/s$, $V_2 = -3m/s$)

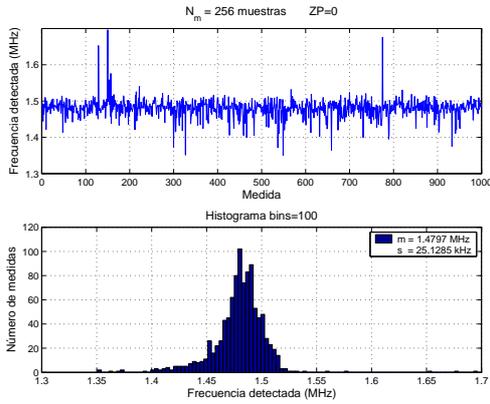


Figura 6.62 Medidas de la velocidad $V_2 = -3m/s$ con $N_m = 256$ y $n_{zp} = 0$

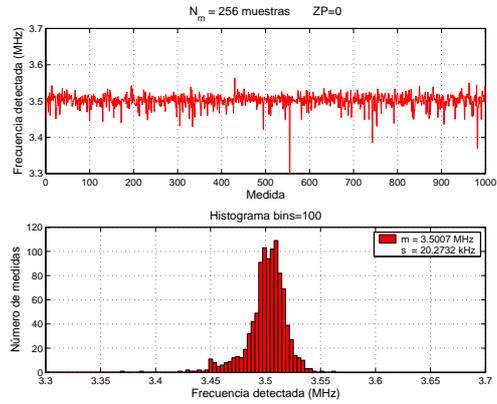


Figura 6.65 Medidas de la velocidad $V_1 = +3m/s$ con $N_m = 256$ y $n_{zp} = 0$

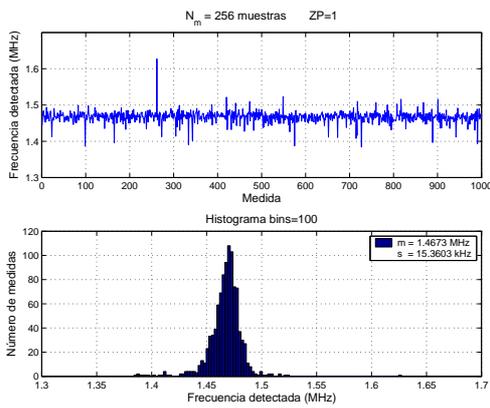


Figura 6.63 Medidas de la velocidad $V_2 = -3m/s$ con $N_m = 256$ y $n_{zp} = 1$

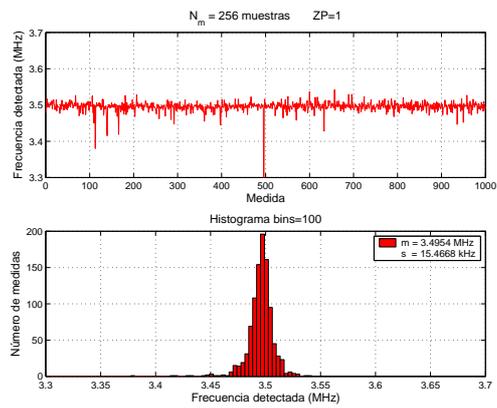


Figura 6.66 Medidas de la velocidad $V_1 = +3m/s$ con $N_m = 256$ y $n_{zp} = 1$

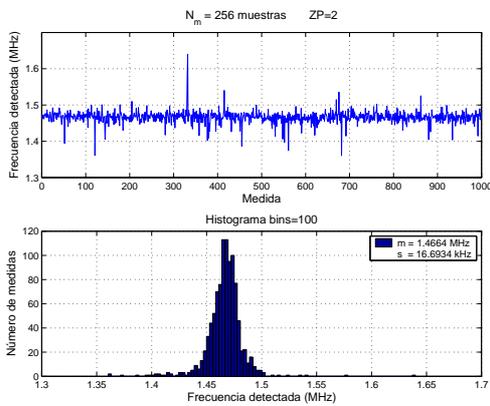


Figura 6.64 Medidas de la velocidad $V_2 = -3m/s$ con $N_m = 256$ y $n_{zp} = 2$

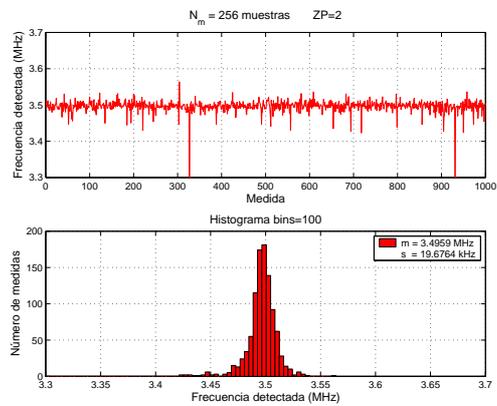


Figura 6.67 Medidas de la velocidad $V_1 = +3m/s$ con $N_m = 256$ y $n_{zp} = 2$

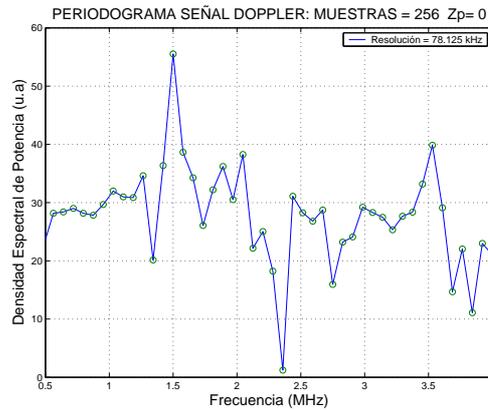


Figura 6.68 Espectro de la señal Doppler con 256 muestras y *zero-padding* $n_{zp} = 0$ ($V_1 = +3m/s$, $V_2 = -3m/s$)

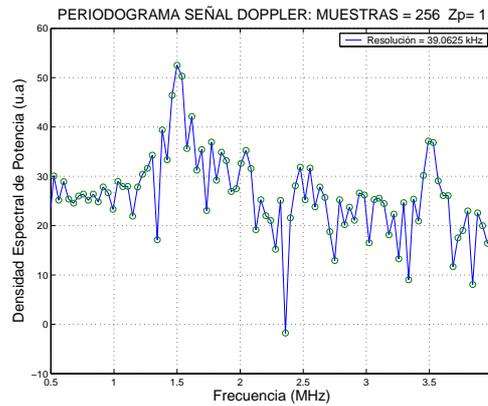


Figura 6.69 Espectro de la señal Doppler con 256 muestras y *zero-padding* $n_{zp} = 1$ ($V_1 = +3m/s$, $V_2 = -3m/s$)

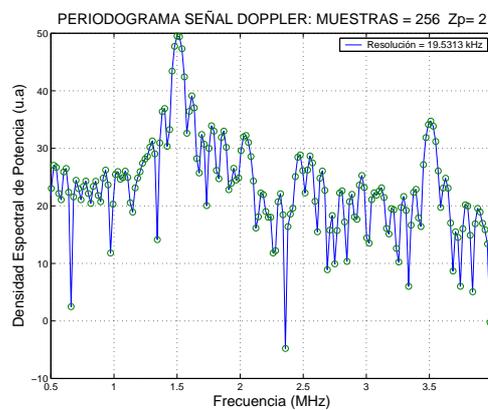


Figura 6.70 Espectro de la señal Doppler con 256 muestras y *zero-padding* $n_{zp} = 2$ ($V_1 = +3m/s$, $V_2 = -3m/s$)

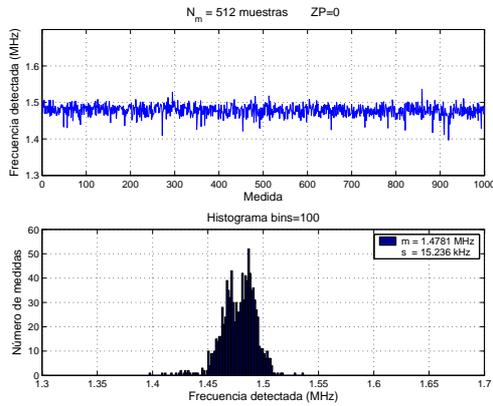


Figura 6.71 Medidas de la velocidad $V_2 = -3m/s$ con $N_m = 512$ y $n_{zp} = 0$

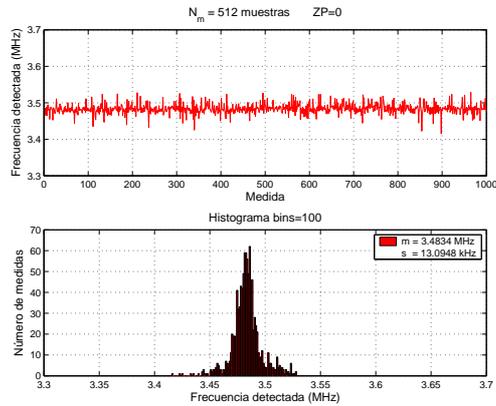


Figura 6.74 Medidas de la velocidad $V_1 = +3m/s$ con $N_m = 512$ y $n_{zp} = 0$

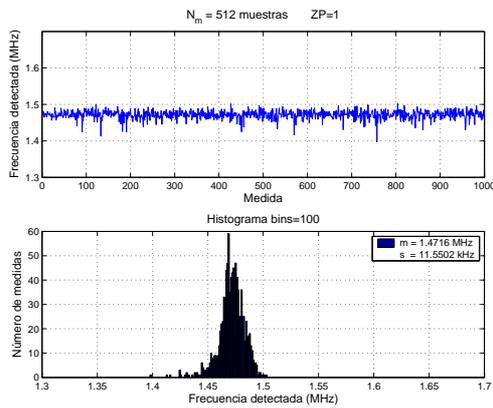


Figura 6.72 Medidas de la velocidad $V_2 = -3m/s$ con $N_m = 512$ y $n_{zp} = 1$

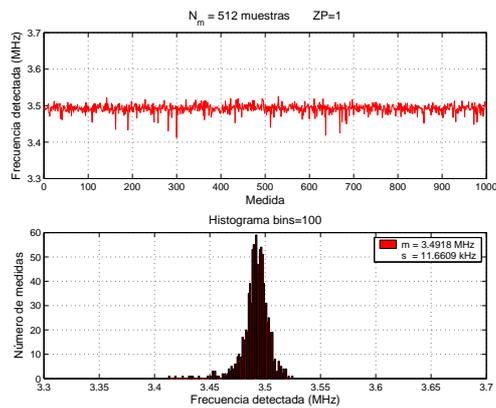


Figura 6.75 Medidas de la velocidad $V_1 = +3m/s$ con $N_m = 512$ y $n_{zp} = 1$

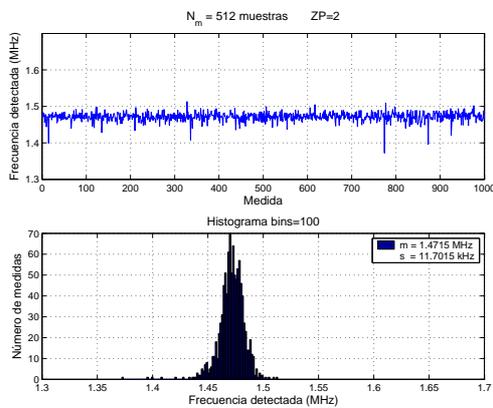


Figura 6.73 Medidas de la velocidad $V_2 = -3m/s$ con $N_m = 512$ y $n_{zp} = 2$

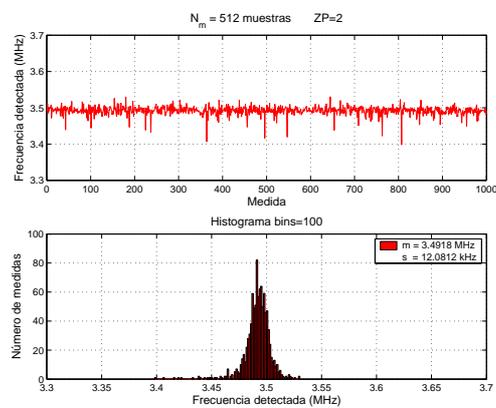


Figura 6.76 Medidas de la velocidad $V_1 = +3m/s$ con $N_m = 512$ y $n_{zp} = 2$

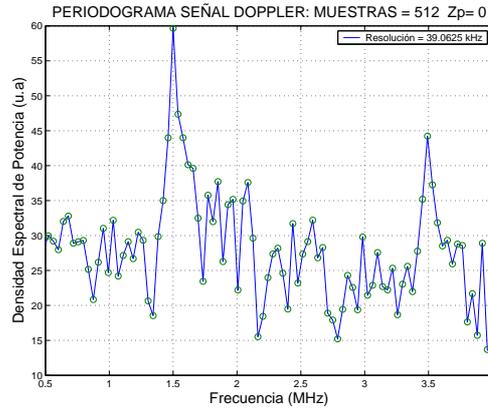


Figura 6.77 Espectro de la señal Doppler con 512 muestras y *zero-padding* $n_{zp} = 0$ ($V_1 = +3m/s$, $V_2 = -3m/s$)

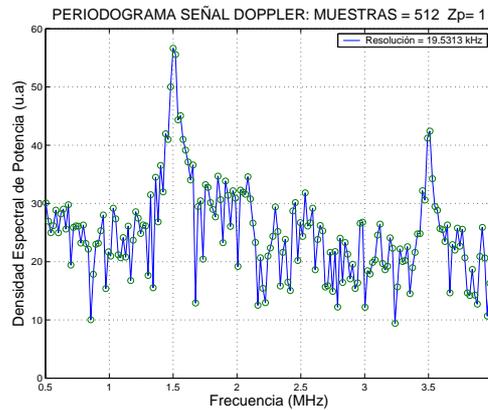


Figura 6.78 Espectro de la señal Doppler con 512 muestras y *zero-padding* $n_{zp} = 1$ ($V_1 = +3m/s$, $V_2 = -3m/s$)

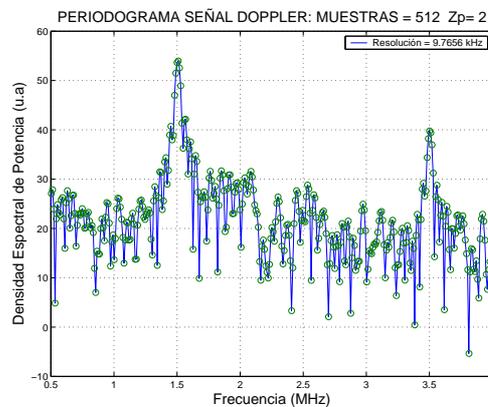


Figura 6.79 Espectro de la señal Doppler con 512 muestras y *zero-padding* $n_{zp} = 2$ ($V_1 = +3m/s$, $V_2 = -3m/s$)

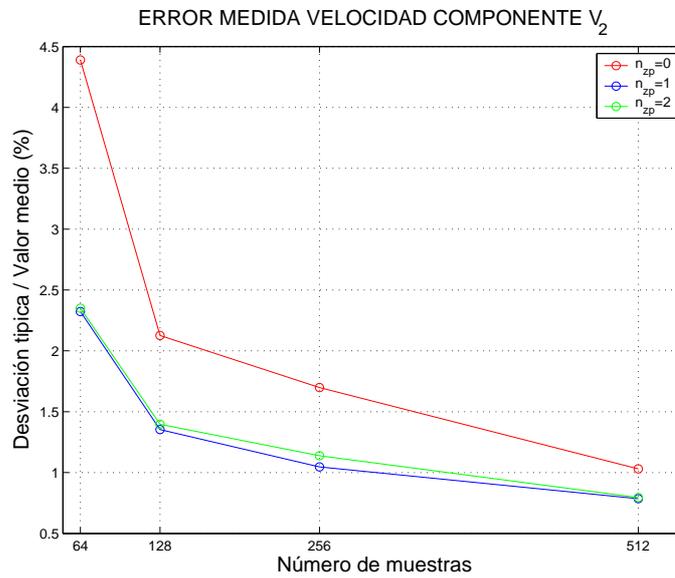


Figura 6.80 Error en % de la medida de la componente de velocidad V_2 de la señal Doppler con 64, 128, 256 y 512 muestras y *zero-padding* $n_{zp} = 0$, $n_{zp} = 1$ y $n_{zp} = 2$ ($V_2 = -3m/s$)

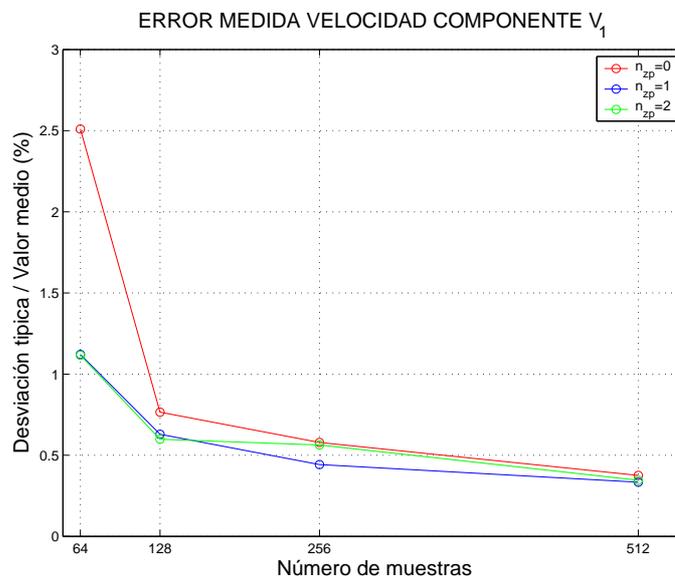


Figura 6.81 Error en % de la medida de la componente de velocidad V_1 de la señal Doppler con 64, 128, 256 y 512 muestras y *zero-padding* $n_{zp} = 0$, $n_{zp} = 1$ y $n_{zp} = 2$ ($V_1 = +3m/s$)

6.2.6. Medidas en todo el margen de velocidades

Una vez comprobado que el sistema cumple con todos los criterios de diseño, vamos a presentar diferentes medidas de la velocidad del blanco rotatorio, entre $\pm 3\text{m/s}$, para las dos componentes de velocidad V_1 y V_2 .

Tal como se describió en el apartado 6.2.4, con el disco en posición vertical realizaremos once medidas en diferentes puntos del diámetro del blanco. Ajustando la velocidad de rotación del motor a una velocidad angular de 76.98 rad/s , aproximadamente 735 rpm , conseguiremos una velocidad lineal del disco, en la parte más externa, de 3.46 m/s .

Así, en todos los puntos de medida P_i ($i=1$ a 11) de la figura 6.4, obtendremos todo el margen de variación de las dos componentes de velocidad entre $\pm 3\text{ m/s}$.

En esta caracterización hemos realizado 2000 medidas de las dos frecuencias que forman la señal Doppler, a partir de 512 muestras y utilizando un orden de *zero-padding* de 2 , en cada punto P_i .

Si observamos los resultados presentados en las figuras 6.82-6.114 podemos plantear diferentes conclusiones:

1. A medida que la velocidad de rotación se va incrementando, el error aumenta, principalmente por dos motivos. El primero son las vibraciones del disco (que se pueden advertir a simple vista), y a las derivas de la velocidad de rotación del motor. Y el segundo, aunque de menor importancia, es que cuánto mayor es la velocidad de giro, menor es la frecuencia de los batidos Doppler y, por tanto, se produce mayor error.
2. El error relativo cometido en la estimación de la componente V_1 siempre será menor que en de la estimación de la V_2 , ya que el margen frecuencial de la primera siempre será mayor que el de la segunda. Es decir, el número de franjas que cruza el blanco será menor en la componente V_2 que en la V_1 (apartado 4.5).
3. El error relativo de las dos componentes de velocidad se mantiene en todo el margen por debajo del 1% , a pesar de las vibraciones del disco.
4. Se confirma de que el sistema es capaz de detectar el signo de las componentes de velocidad a partir de las frecuencias de los batidos.

Para finalizar presentamos como resumen la caracterización del blanco rotatorio de la velocidad medida frente a la velocidad teórica, en las figuras 6.115 y 6.117, y el error cometido en todo el margen, figuras 6.116 y 6.118.

- Punto de medida $P_1 \Rightarrow$

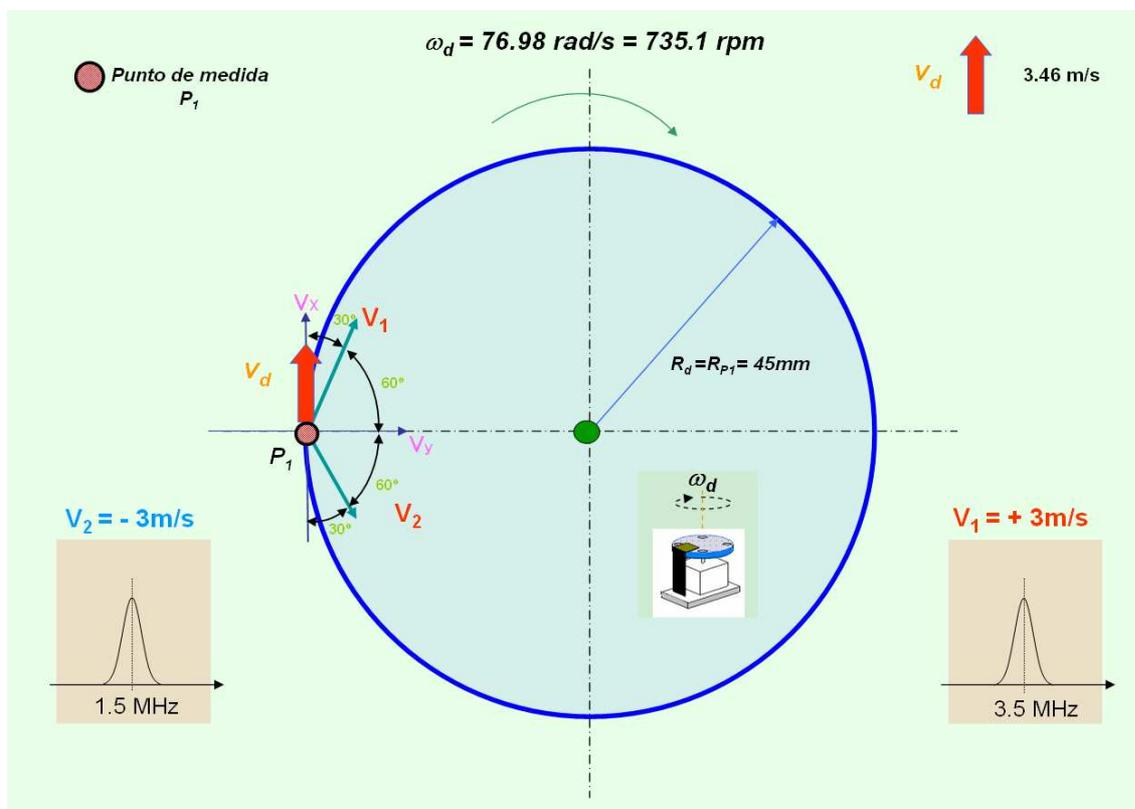


Figura 6.82 Esquema de la medida de la velocidad en el punto P_1 del disco rotatorio

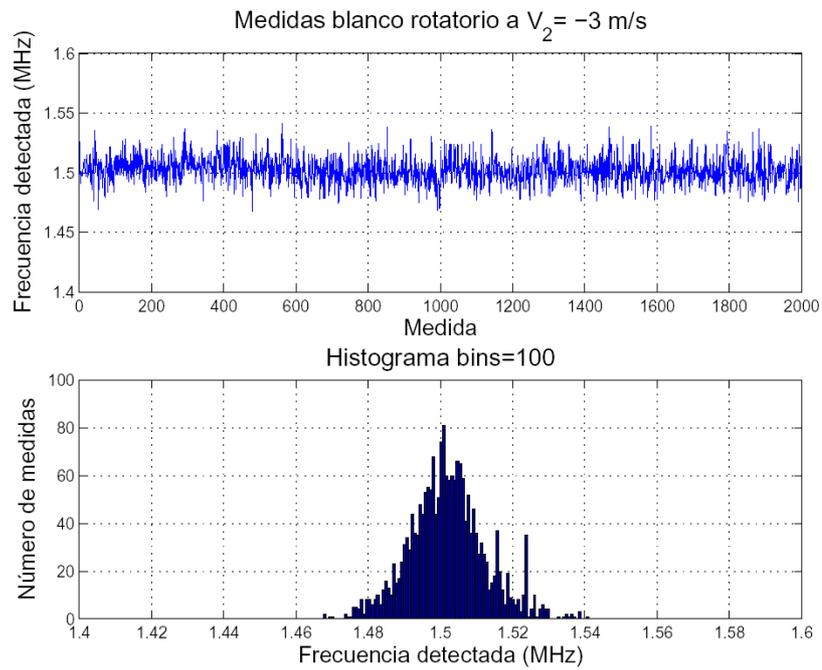


Figura 6.83 Medida de la componente de velocidad V_2 del blanco rotatorio a una velocidad lineal teórica de -3 m/s

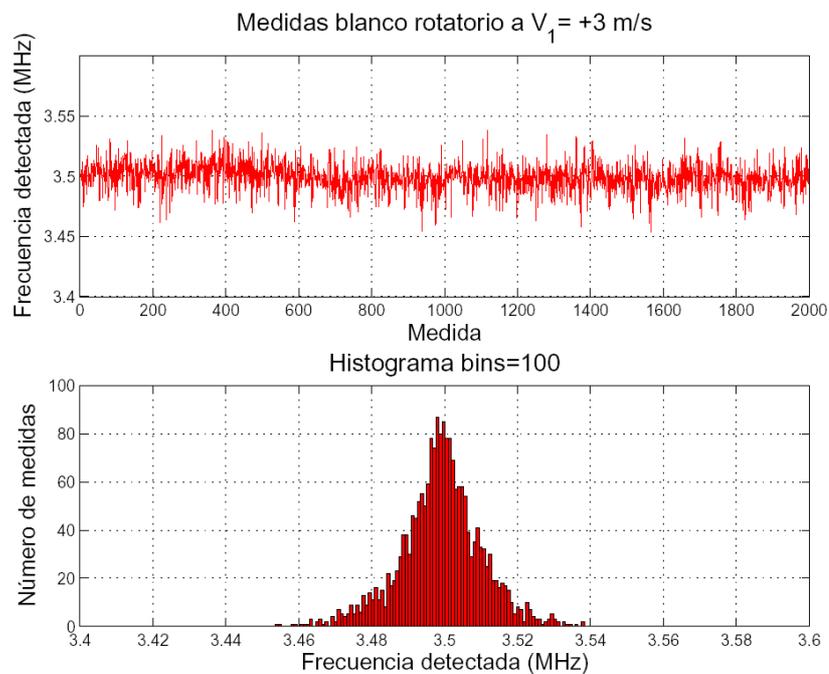


Figura 6.84 Medidas de la velocidad V_1 del blanco rotatorio a una velocidad lineal teórica de $+3$ m/s

- Punto de medida $P_2 \Rightarrow$

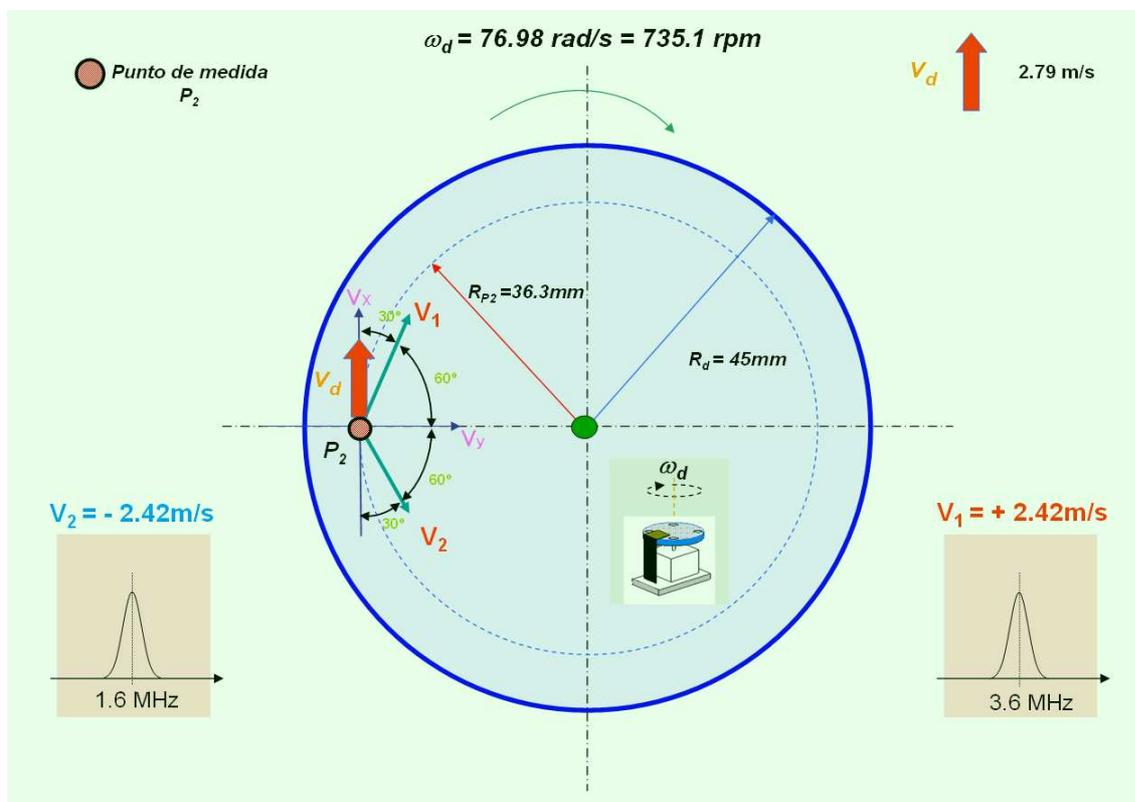


Figura 6.85 Esquema de la medida de la velocidad en el punto P_2 del disco rotatorio

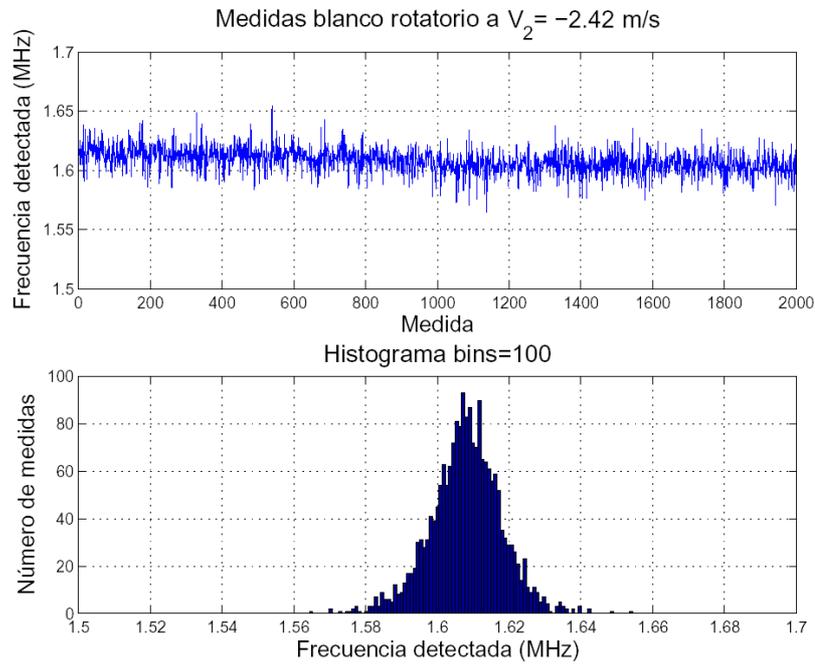


Figura 6.86 Medidas de la componente de velocidad V_2 del blanco rotatorio a una velocidad lineal teórica de -2.42 m/s

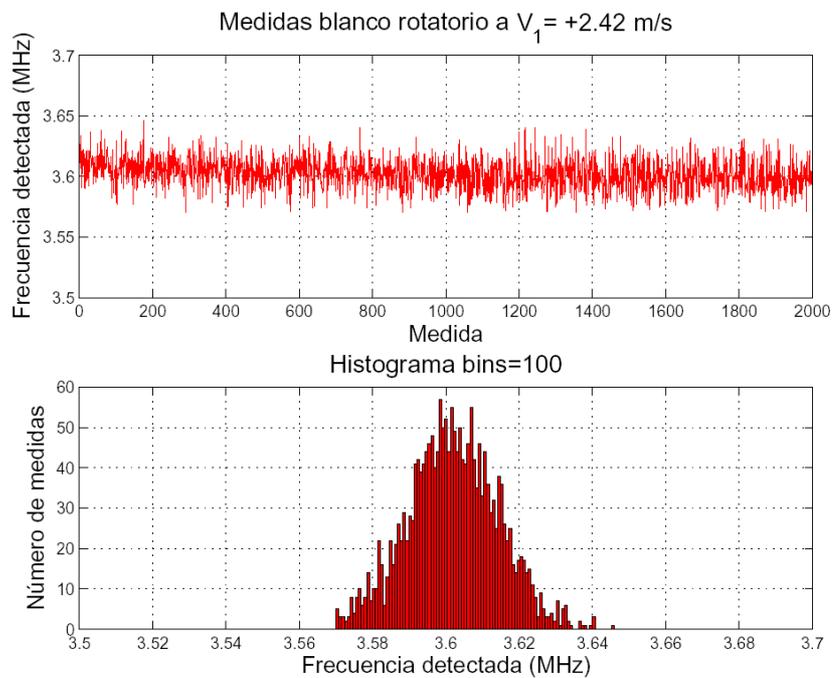


Figura 6.87 Medidas de la componente de velocidad V_1 del blanco rotatorio a una velocidad lineal teórica de $+2.42$ m/s

- Punto de medida $P_3 \Rightarrow$

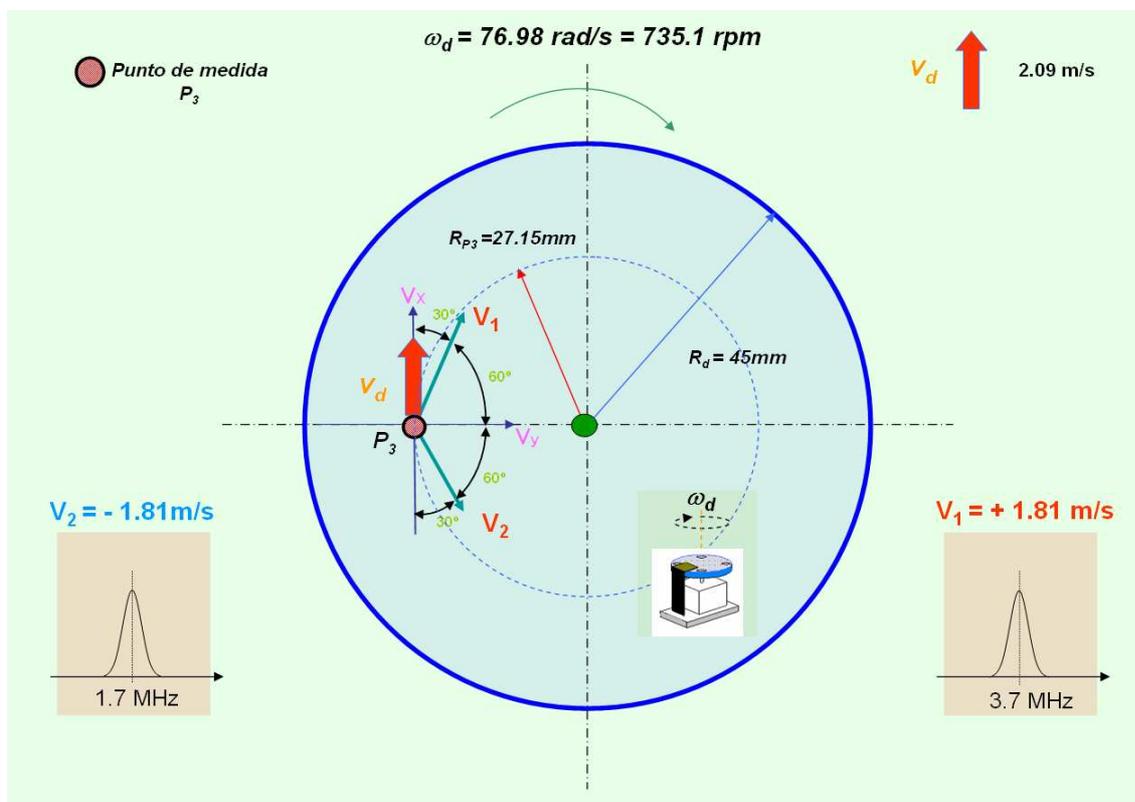


Figura 6.88 Esquema de la medida de la velocidad en el punto P_3 del disco rotatorio

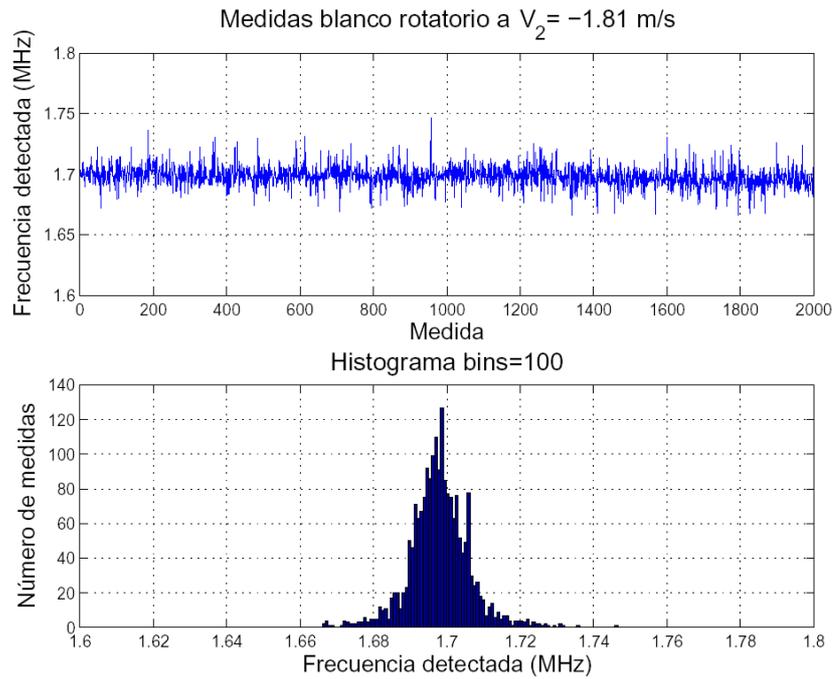


Figura 6.89 Medidas de la componente de velocidad V_2 del blanco rotatorio a una velocidad lineal teórica de -1.81 m/s

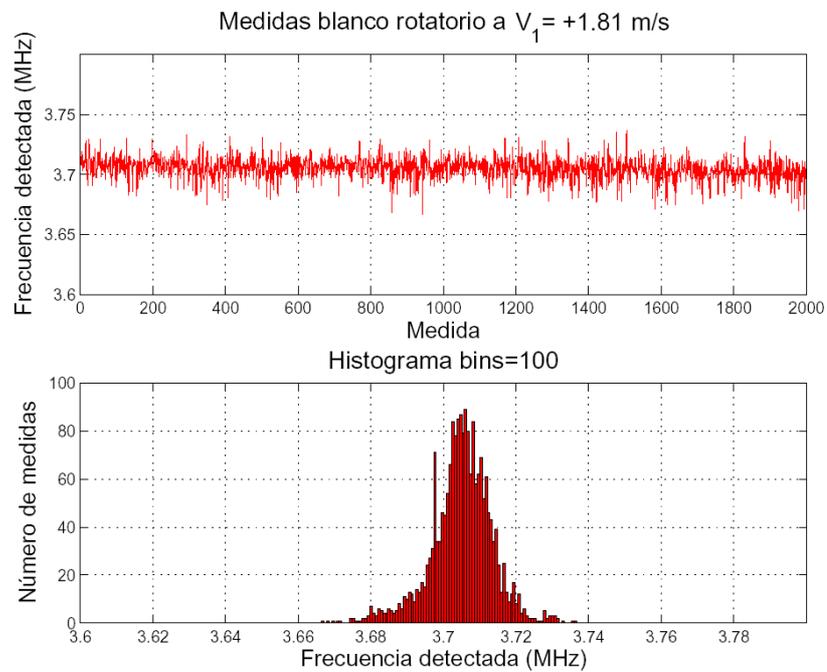


Figura 6.90 Medidas de la componente de velocidad V_1 del blanco rotatorio a una velocidad lineal teórica de $+1.81$ m/s

- Punto de medida $P_4 \Rightarrow$

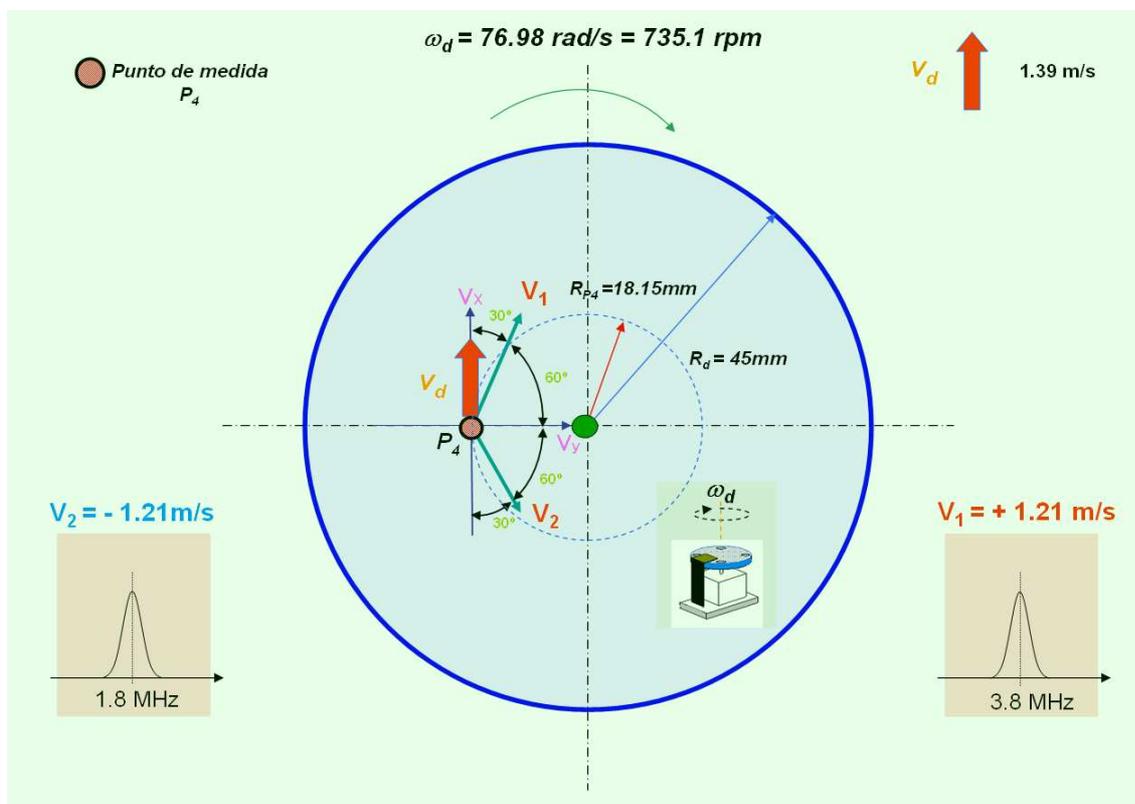


Figura 6.91 Esquema de la medida de la velocidad en el punto P_4 del disco rotatorio

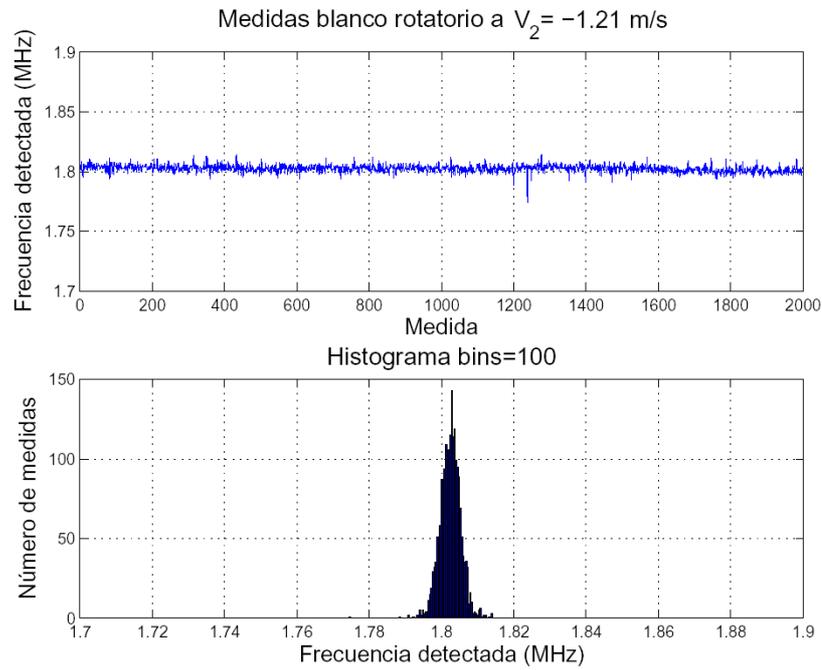


Figura 6.92 Medidas de la componente de velocidad V_2 del blanco rotatorio a una velocidad lineal teórica de -1.21 m/s

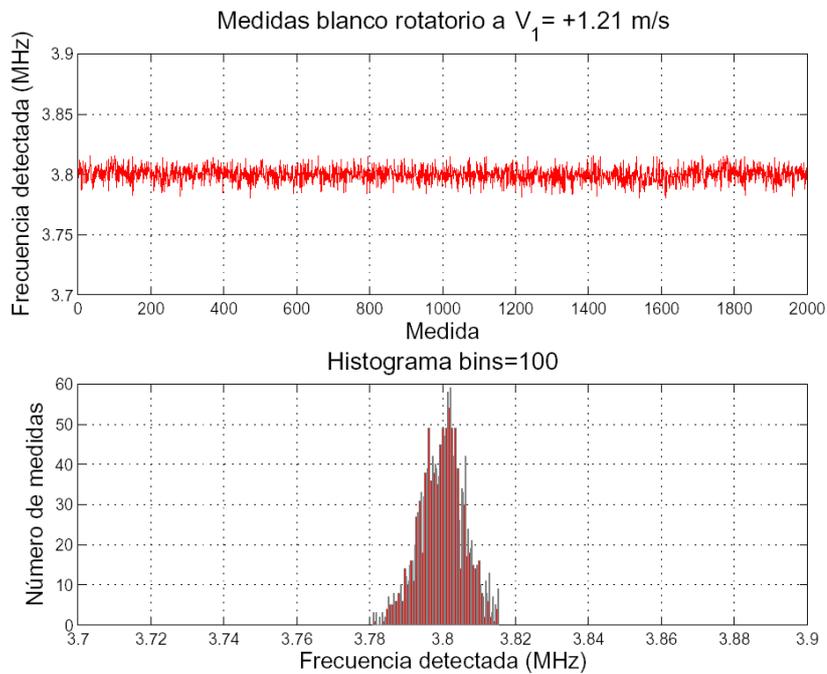


Figura 6.93 Medidas de la componente de velocidad V_1 del blanco rotatorio a una velocidad lineal teórica de $+1.21$ m/s

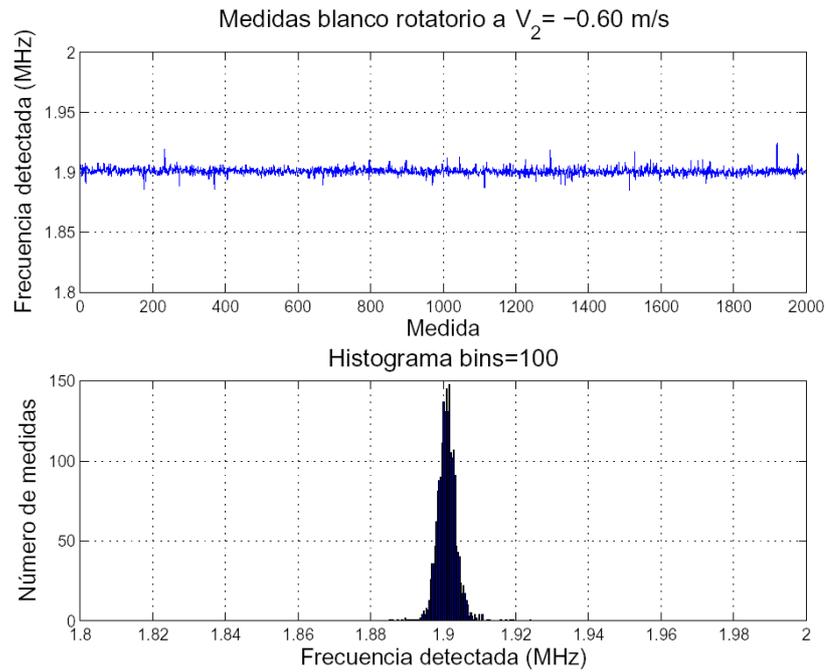


Figura 6.95 Medidas de la componente de velocidad V_2 del blanco rotatorio a una velocidad lineal teórica de -0.60 m/s

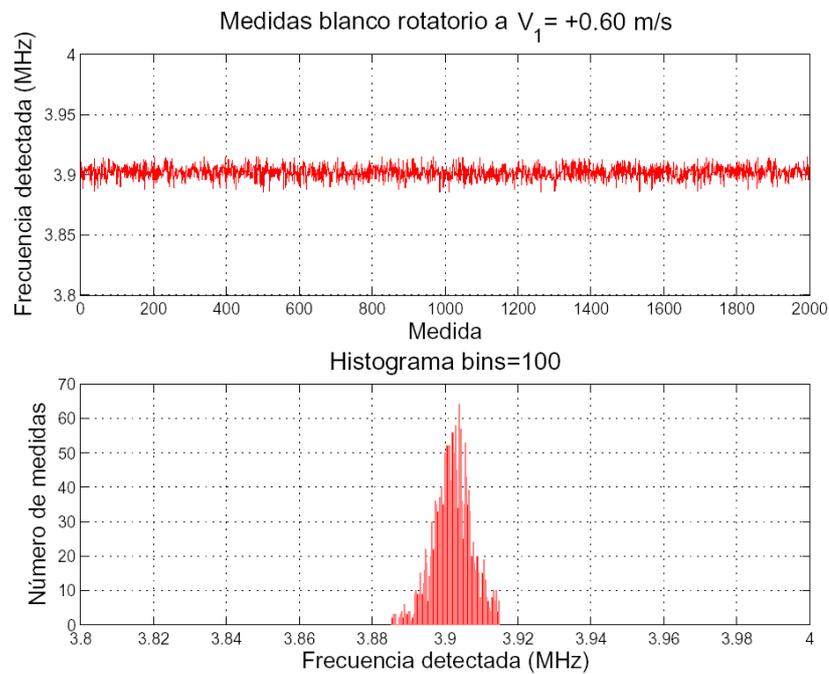


Figura 6.96 Medidas de la componente de velocidad V_1 del blanco rotatorio a una velocidad lineal teórica de $+0.60$ m/s

- Punto de medida $P_6 \Rightarrow$

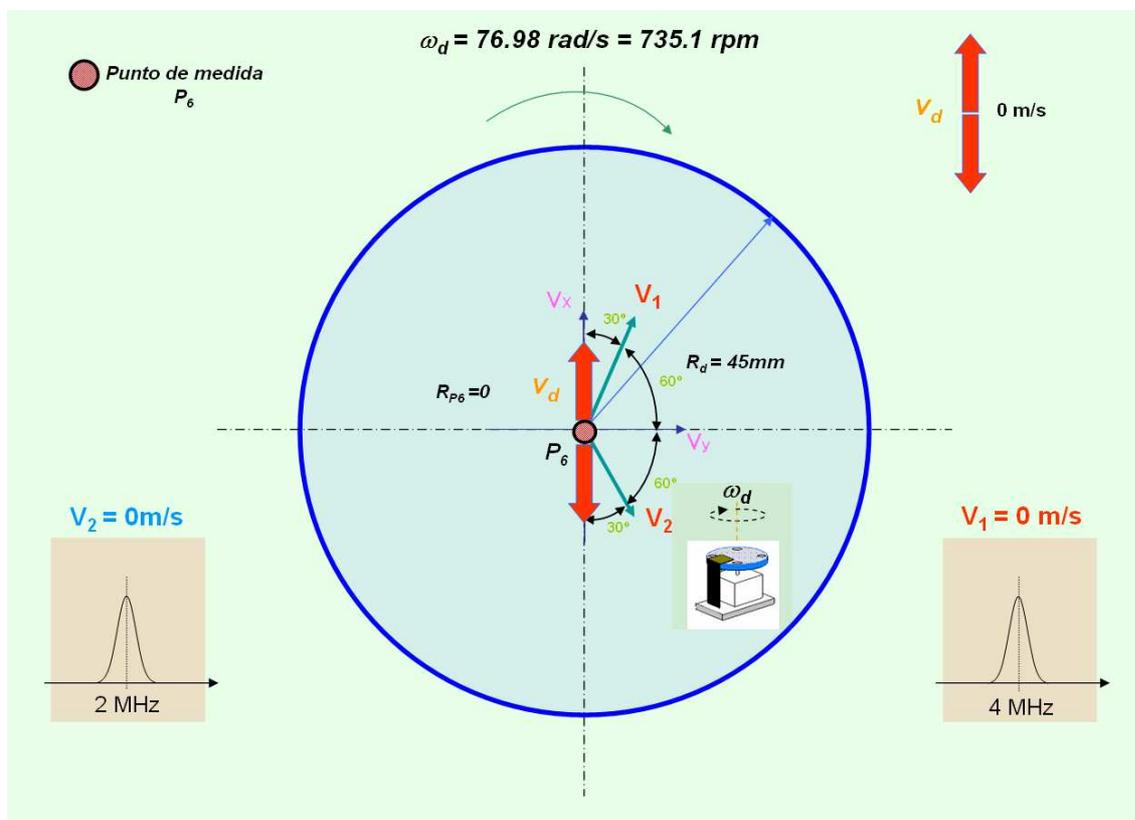


Figura 6.97 Esquema de la medida de la velocidad en el punto P_6 del disco rotatorio

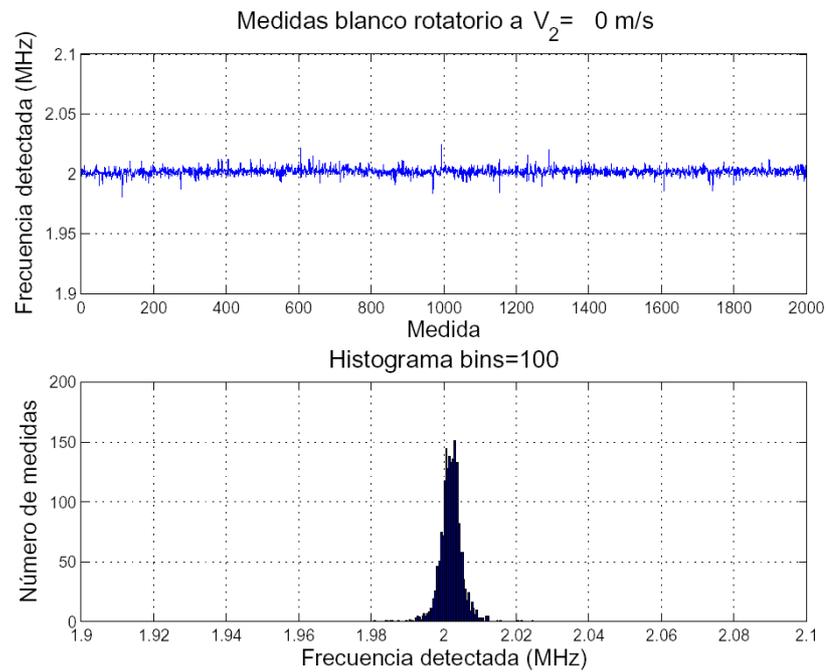


Figura 6.98 Medidas de la componente de velocidad V_2 del blanco rotatorio a una velocidad lineal teórica de 0 m/s

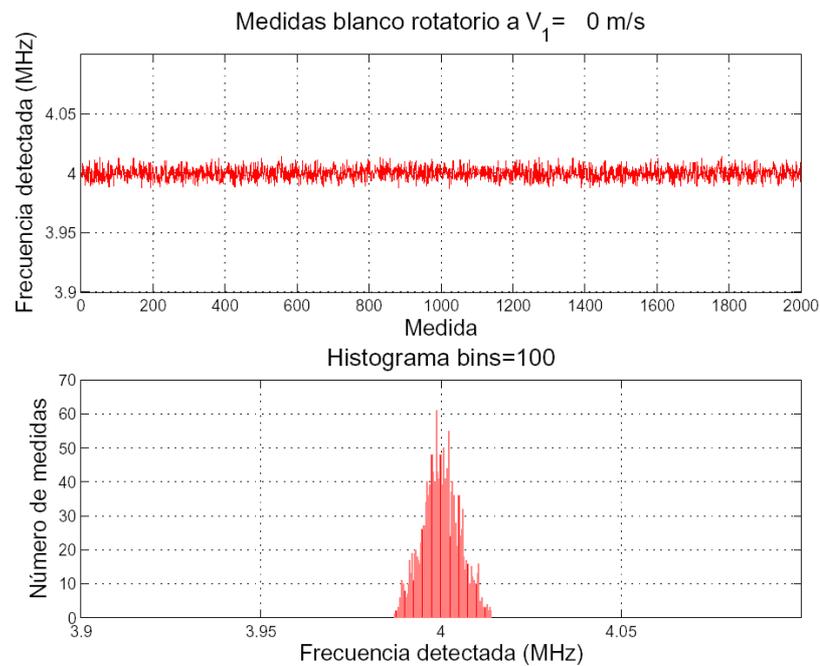


Figura 6.99 Medidas de la componente de velocidad V_1 del blanco rotatorio a una velocidad lineal teórica de 0 m/s

- Punto de medida $P_7 \Rightarrow$

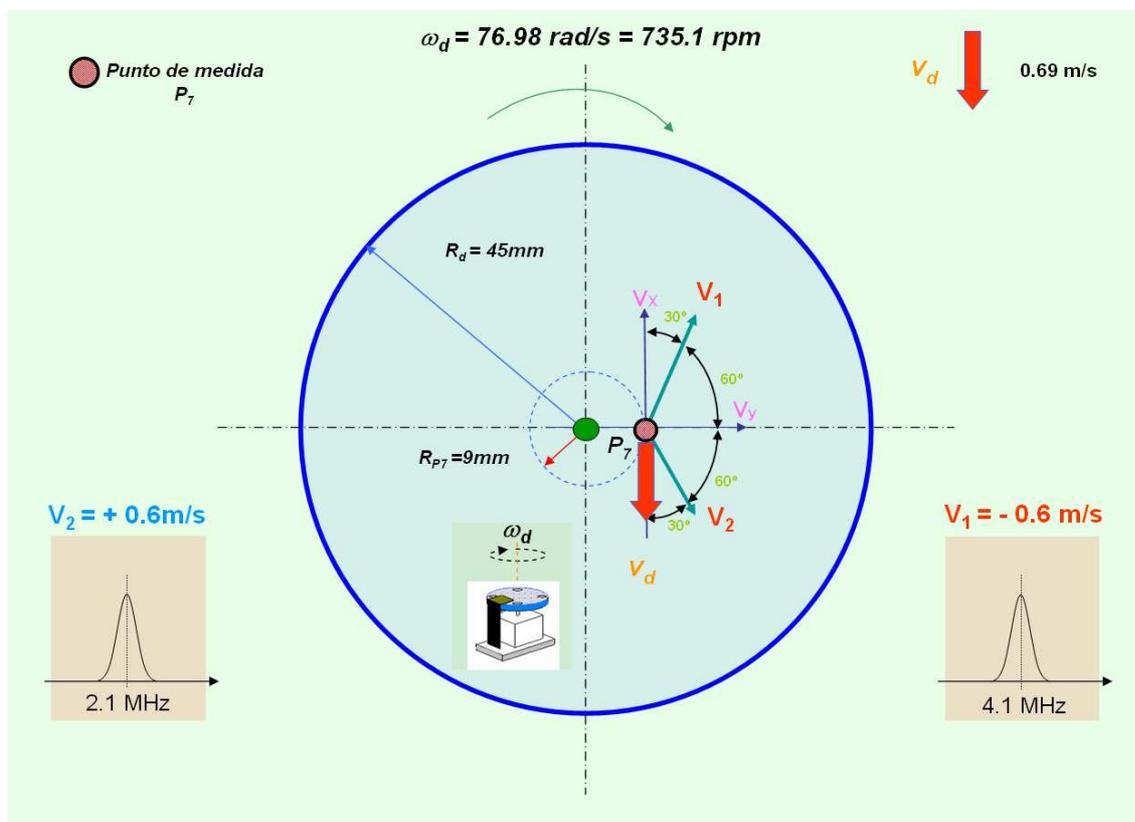


Figura 6.100 Esquema de la medida de la velocidad en el punto P_7 del disco rotatorio

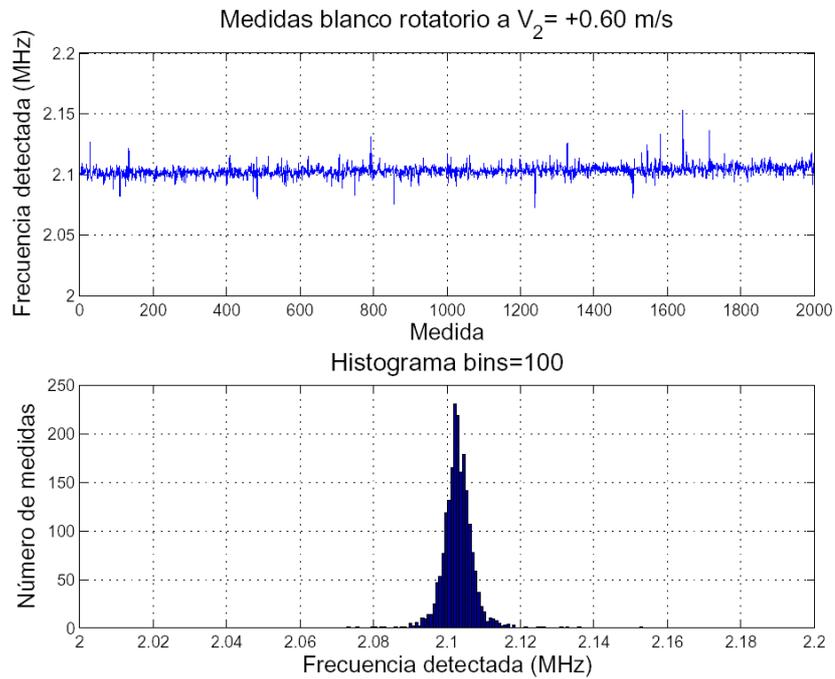


Figura 6.101 Medidas de la componente de velocidad V_2 del blanco rotatorio a una velocidad lineal teórica de +0.6 m/s

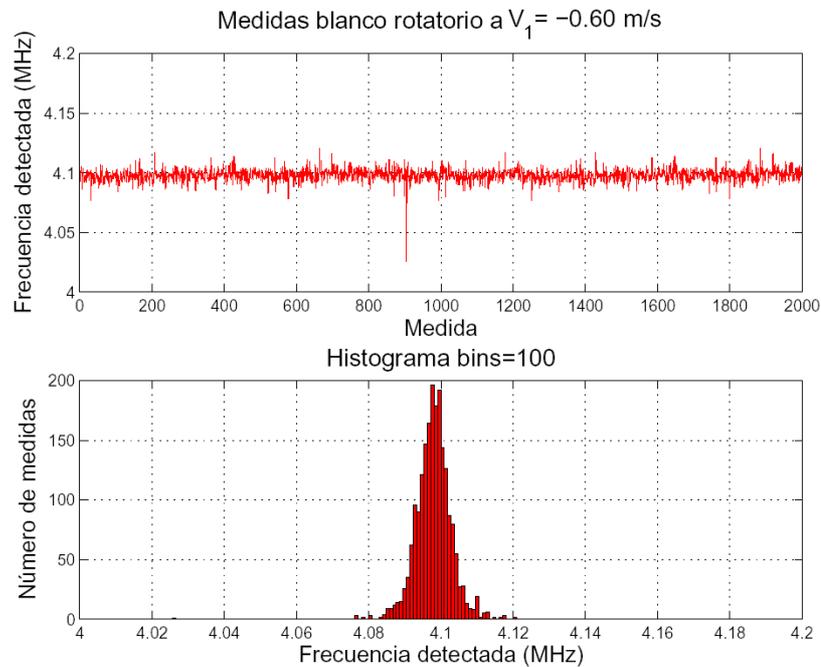


Figura 6.102 Medidas de la componente de velocidad V_1 del blanco rotatorio a una velocidad lineal teórica de -0.6 m/s

- Punto de medida $P_8 \Rightarrow$

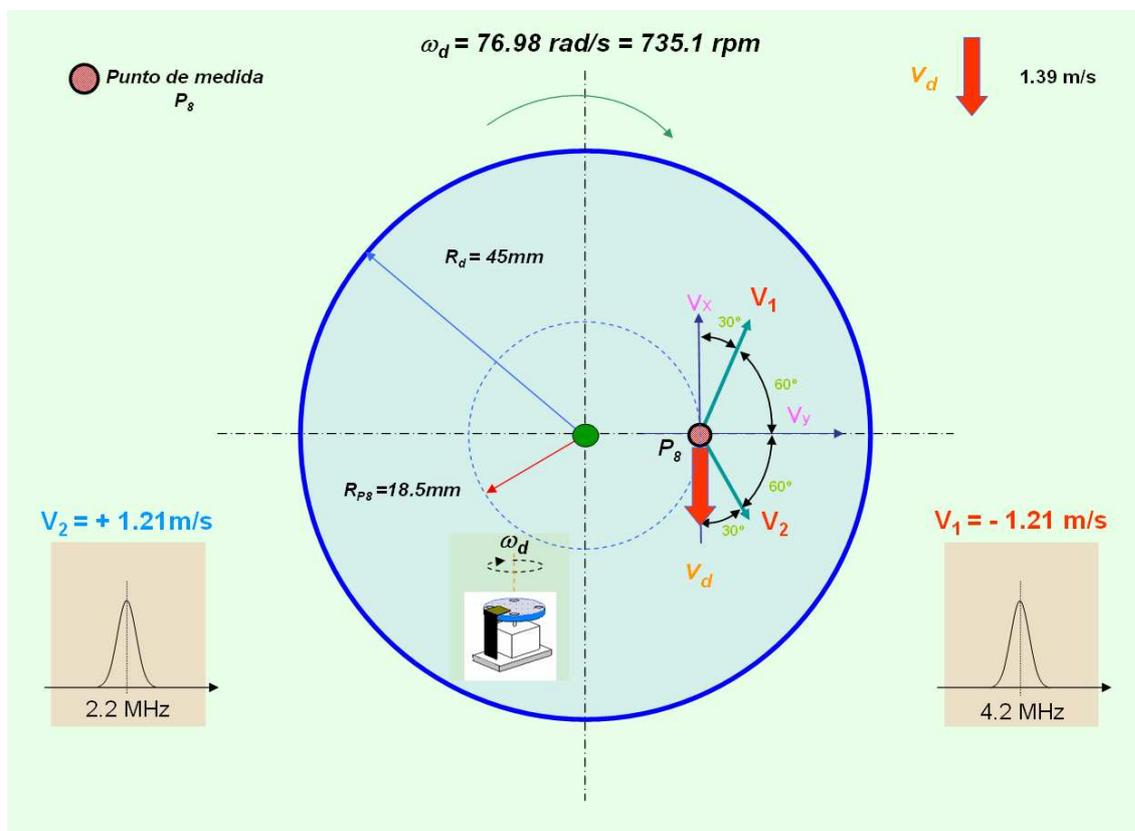


Figura 6.103 Esquema de la medida de la velocidad en el punto P_8 del disco rotatorio

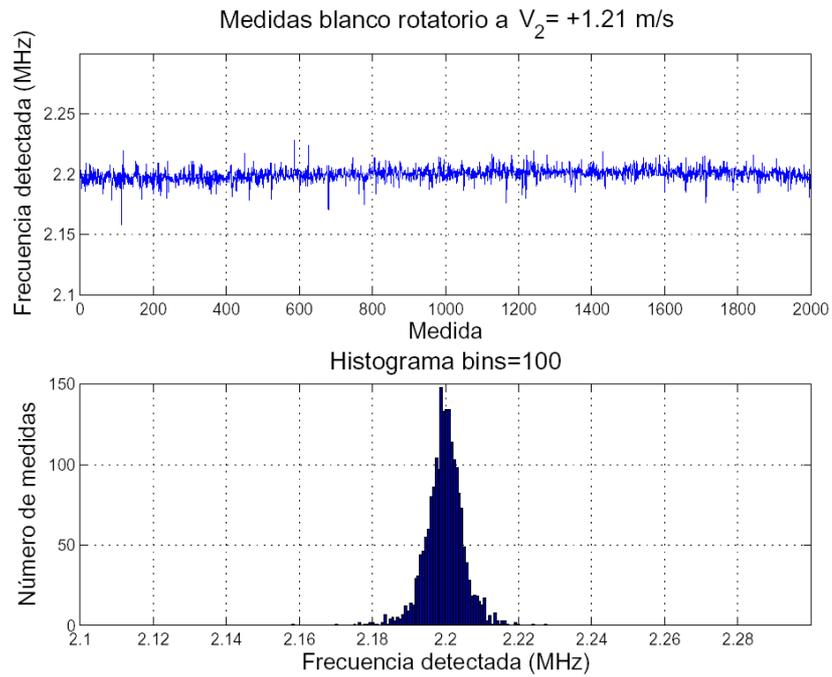


Figura 6.104 Medidas de la componente de velocidad V_2 del blanco rotatorio a una velocidad lineal teórica de +1.21 m/s

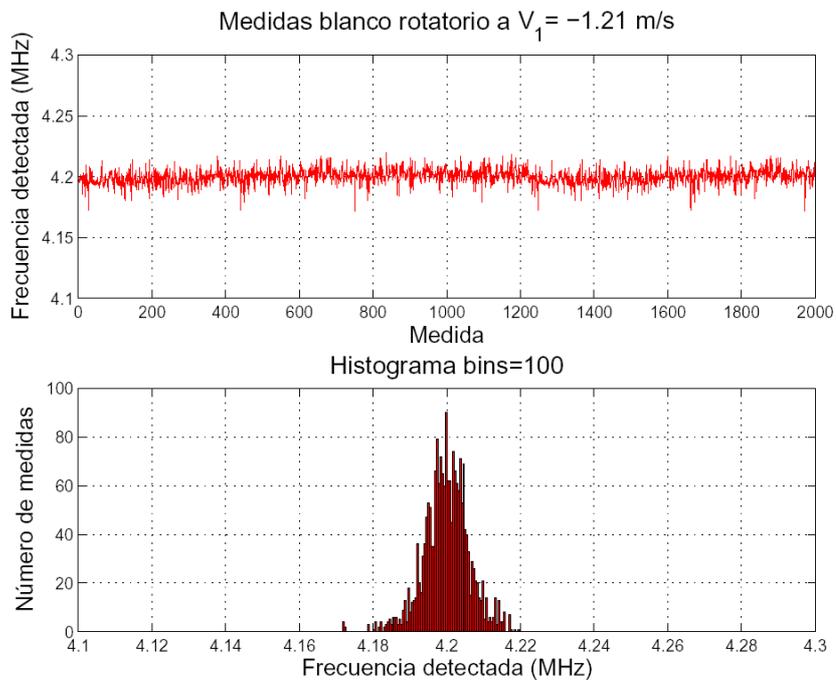


Figura 6.105 Medidas de la componente de velocidad V_1 del blanco rotatorio a una velocidad lineal teórica de -1.21 m/s

- Punto de medida $P_9 \Rightarrow$

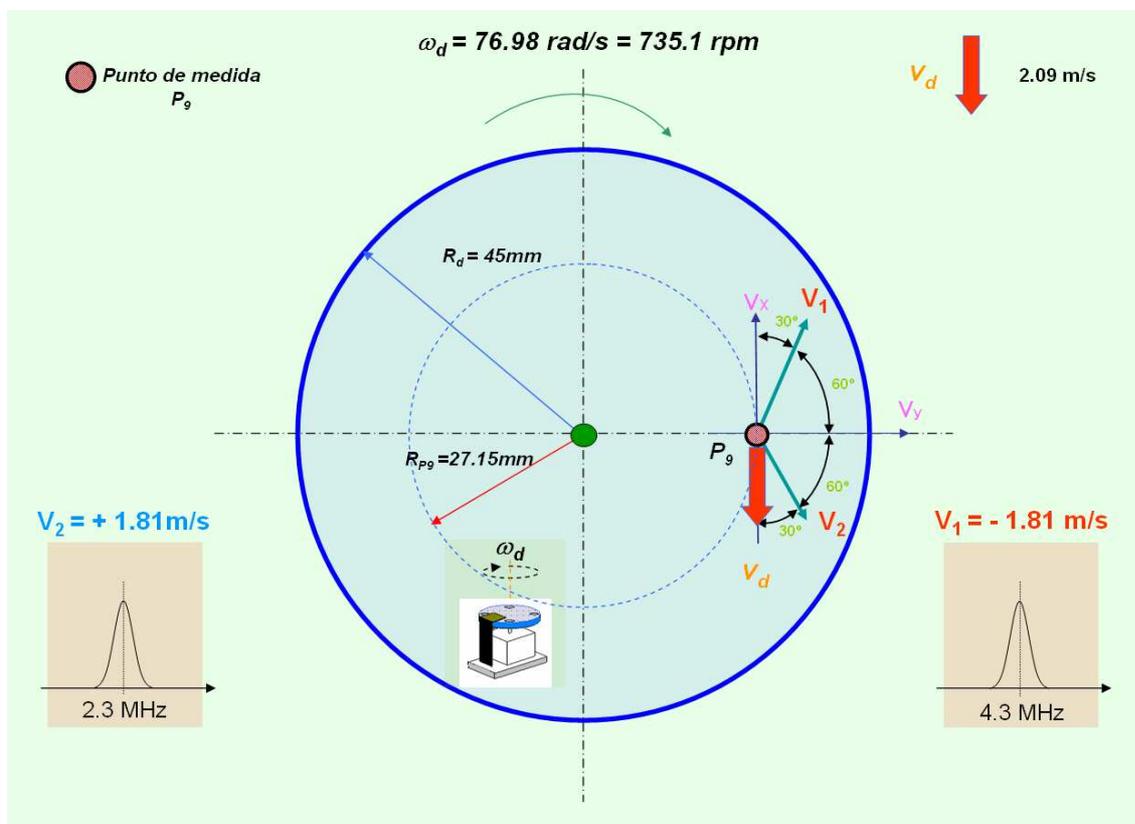


Figura 6.106 Esquema de la medida de la velocidad en el punto P_9 del disco rotatorio

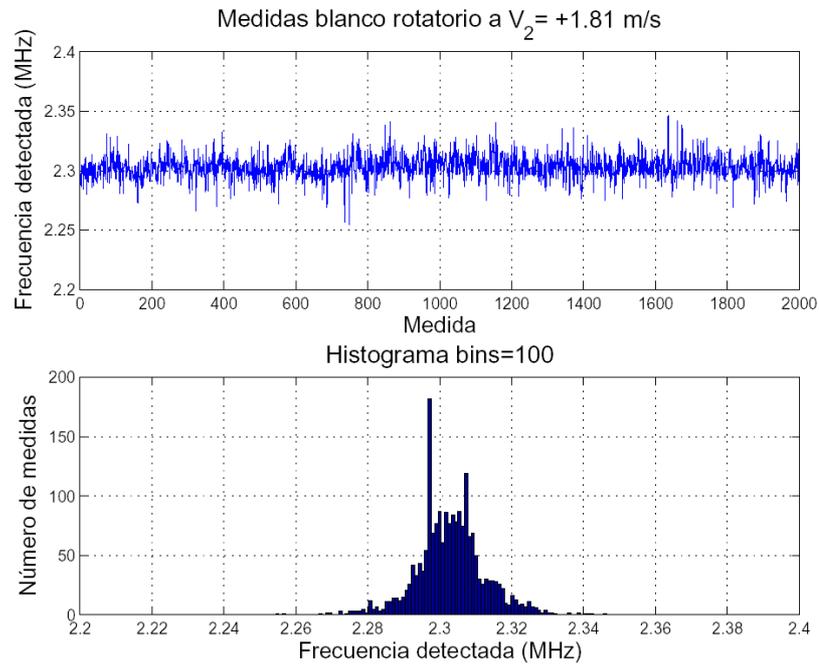


Figura 6.107 Medidas de la componente de velocidad V_2 del blanco rotatorio a una velocidad lineal teórica de +1.81 m/s

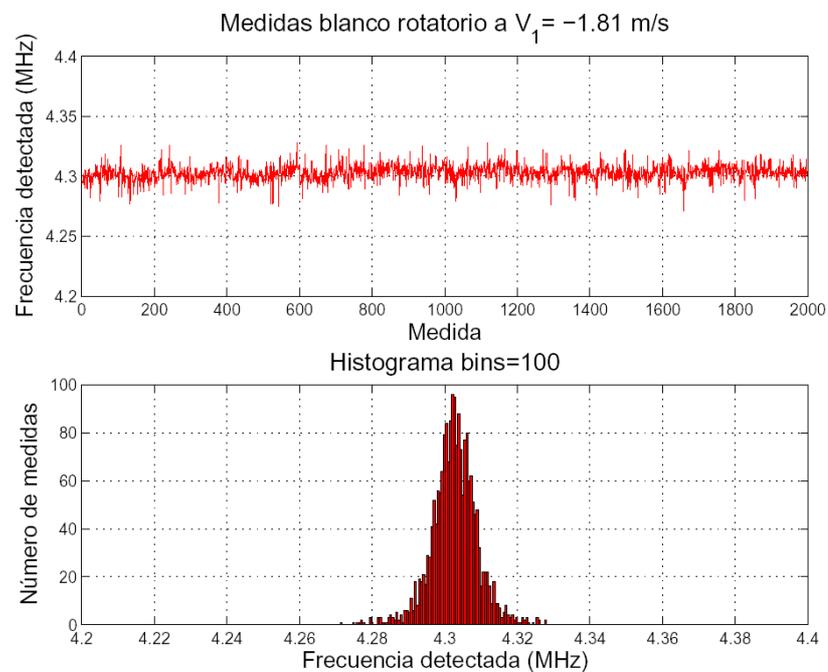


Figura 6.108 Medidas de la componente de velocidad V_1 del blanco rotatorio a una velocidad lineal teórica de -1.81 m/s

- Punto de medida $P_{10} \Rightarrow$

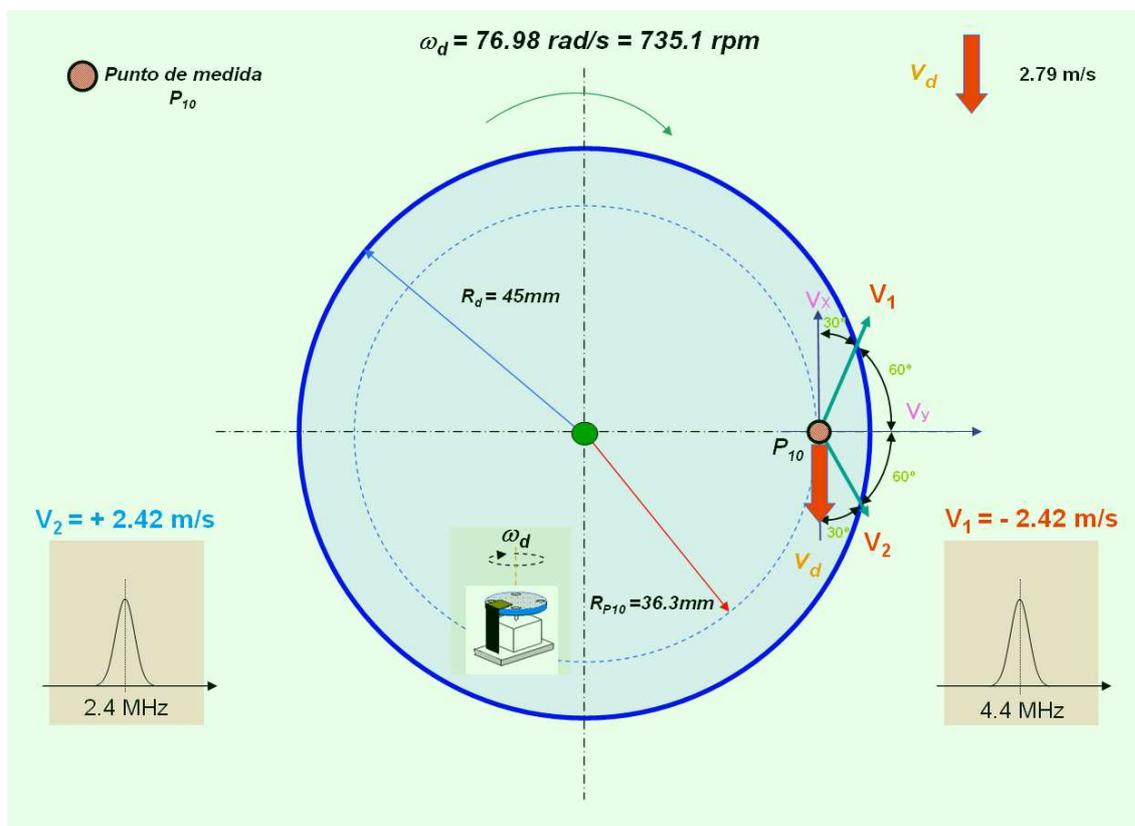


Figura 6.109 Esquema de la medida de la velocidad en el punto P_{10} del disco rotatorio

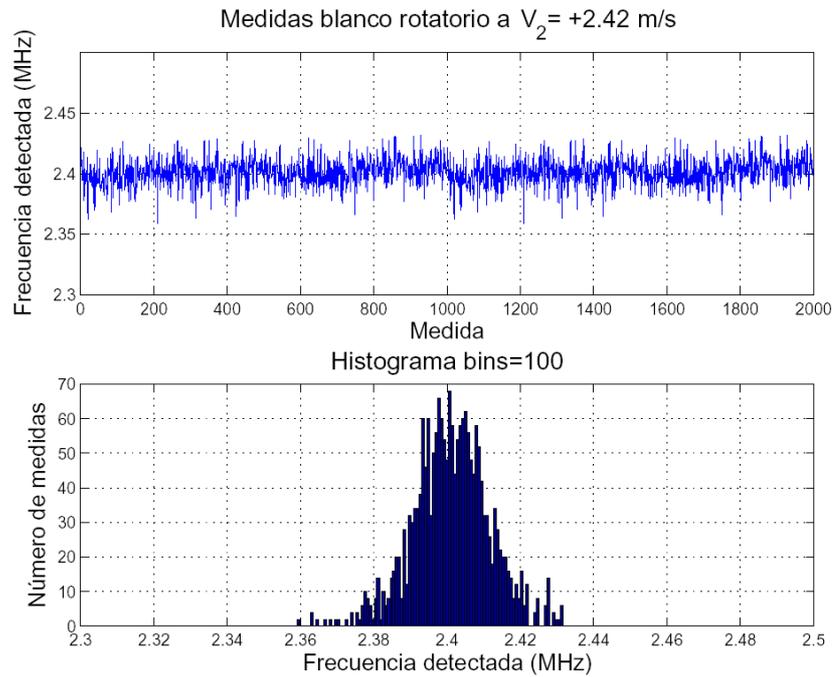


Figura 6.110 Medidas de la componente de velocidad V_2 del blanco rotatorio a una velocidad lineal teórica de +2.42 m/s

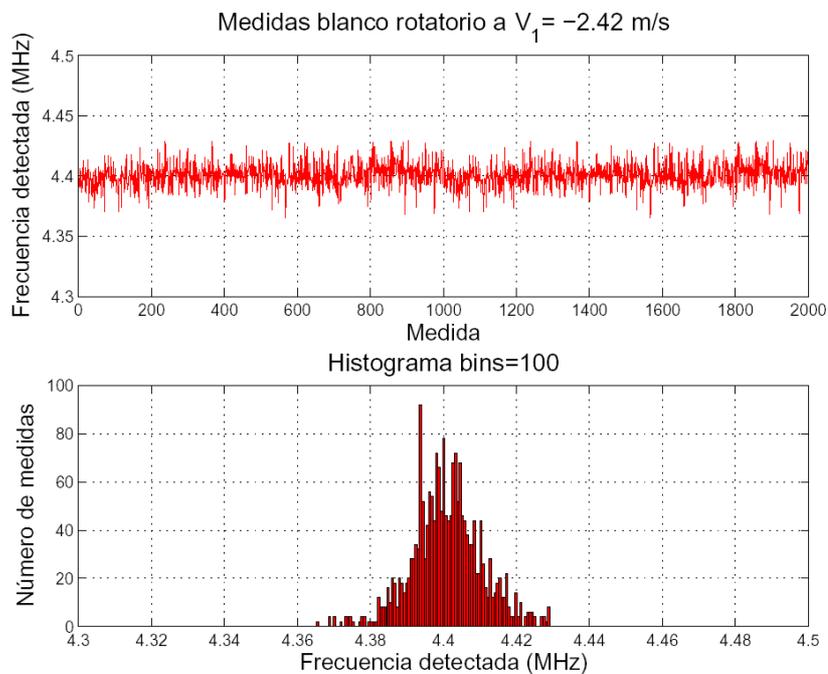


Figura 6.111 Medidas de la componente de velocidad V_1 del blanco rotatorio a una velocidad lineal teórica de -2.42 m/s

- Punto de medida $P_{11} \Rightarrow$

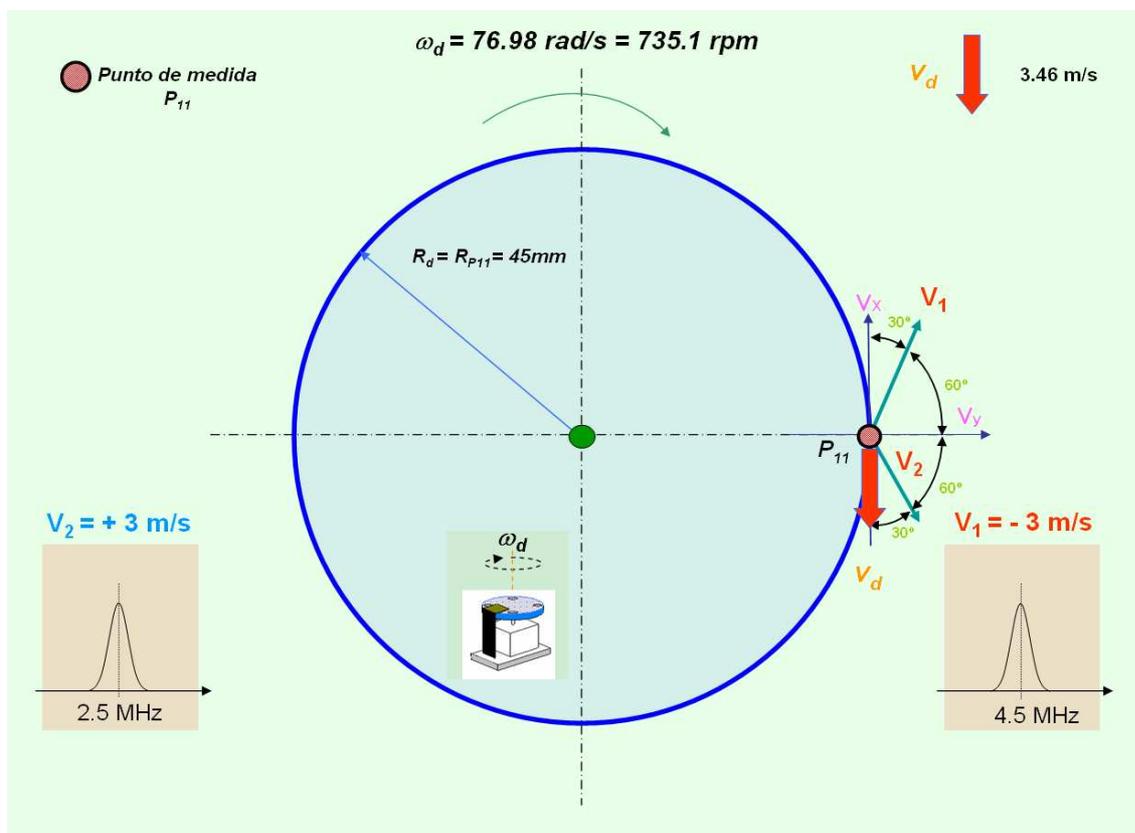


Figura 6.112 Esquema de la medida de la velocidad en el punto P_{11} del disco rotatorio

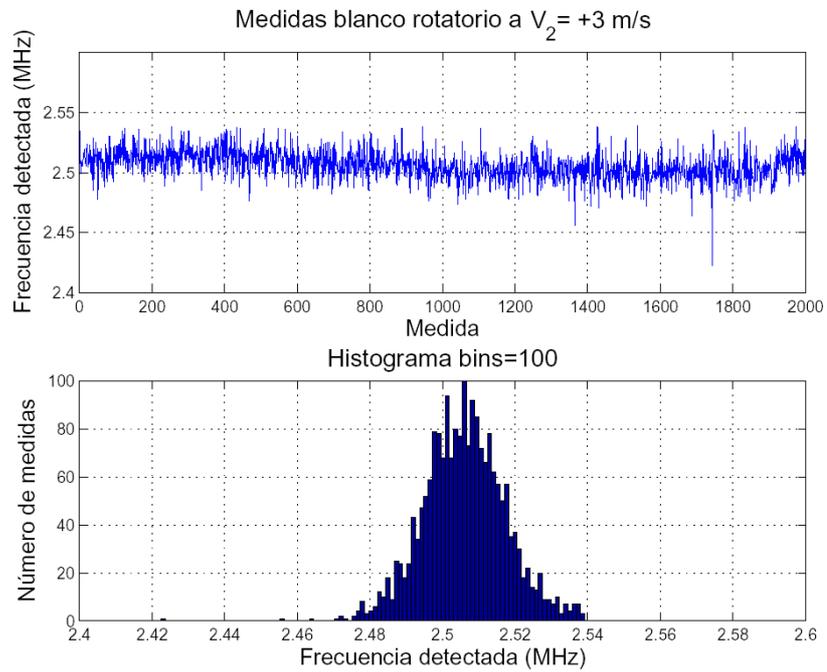


Figura 6.113 Medidas de la componente de velocidad V_2 del blanco rotatorio a una velocidad lineal teórica de +3 m/s

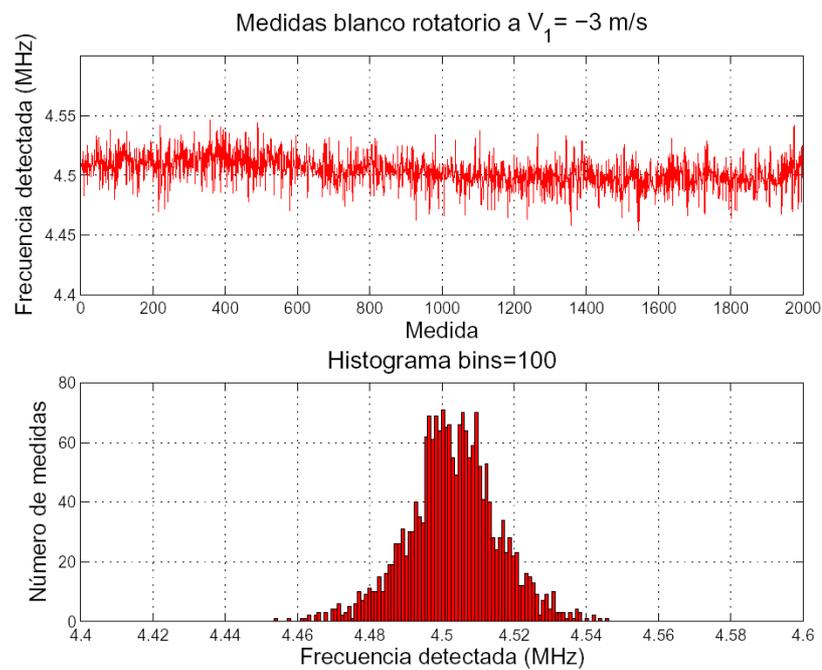


Figura 6.114 Medidas de la componente de velocidad V_1 del blanco rotatorio a una velocidad lineal teórica de -3 m/s

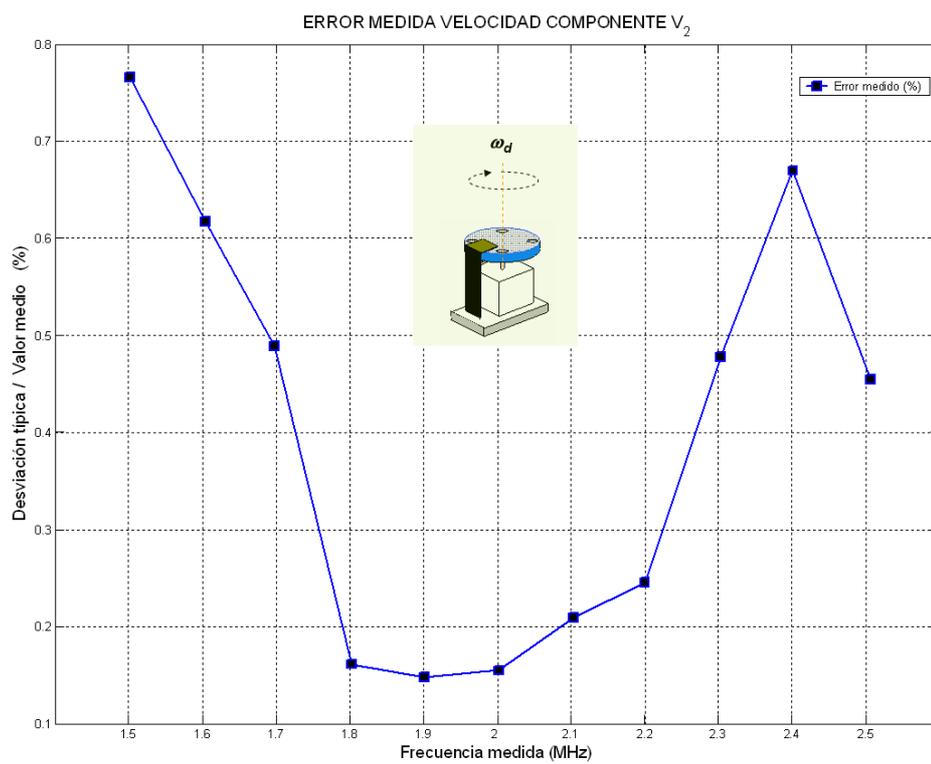


Figura 6.115 Error en % de la medida de la componente de velocidad V_2 de la señal Doppler entre ± 3 m/s con 512 muestras y zero-padding $n_{zp} = 2$

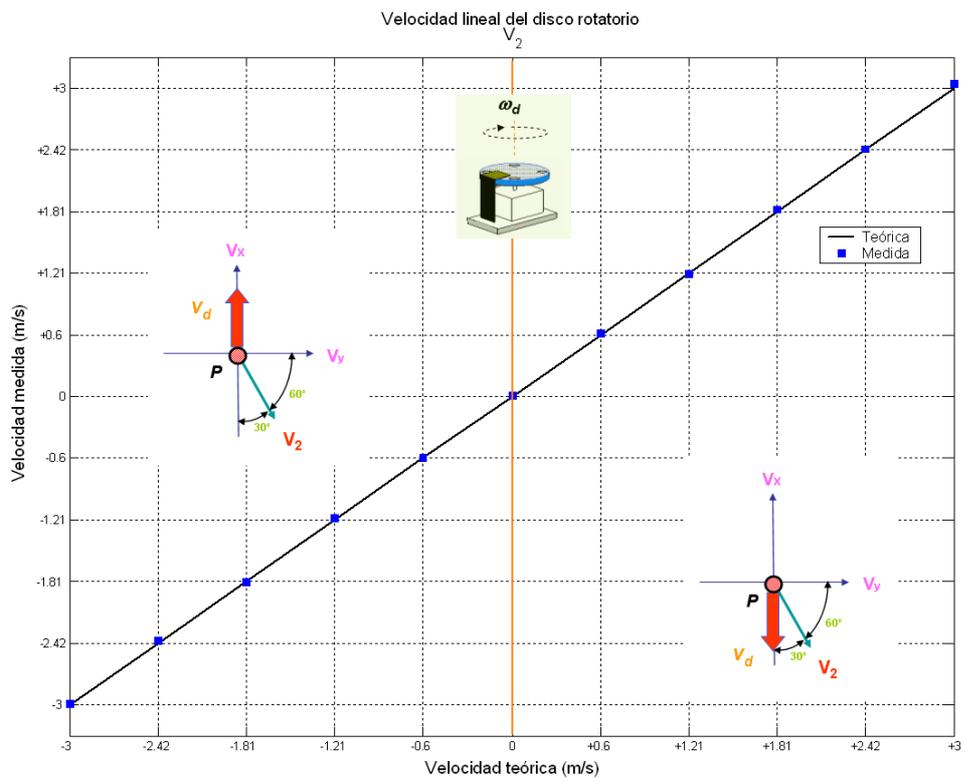


Figura 6.116 Medida de la componente de velocidad V_2 de la señal Doppler entre ± 3 m/s frente a la velocidad teórica

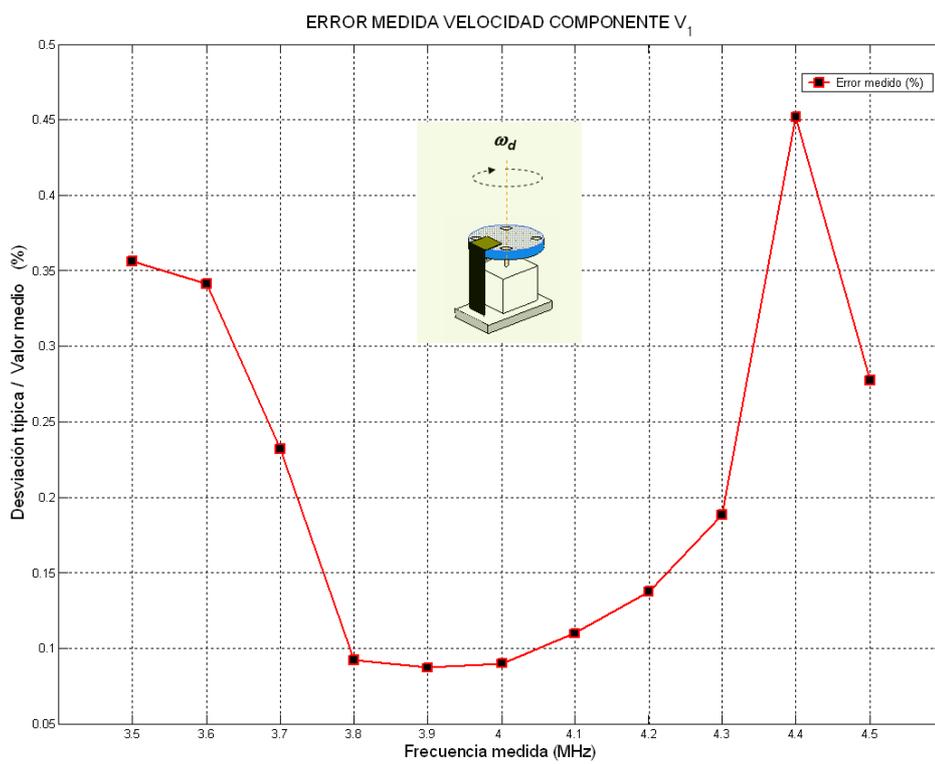


Figura 6.117 Error en % de la medida de la componente de velocidad V_1 de la señal Doppler entre ± 3 m/s con 512 muestras y zero-padding $n_{zp} = 2$

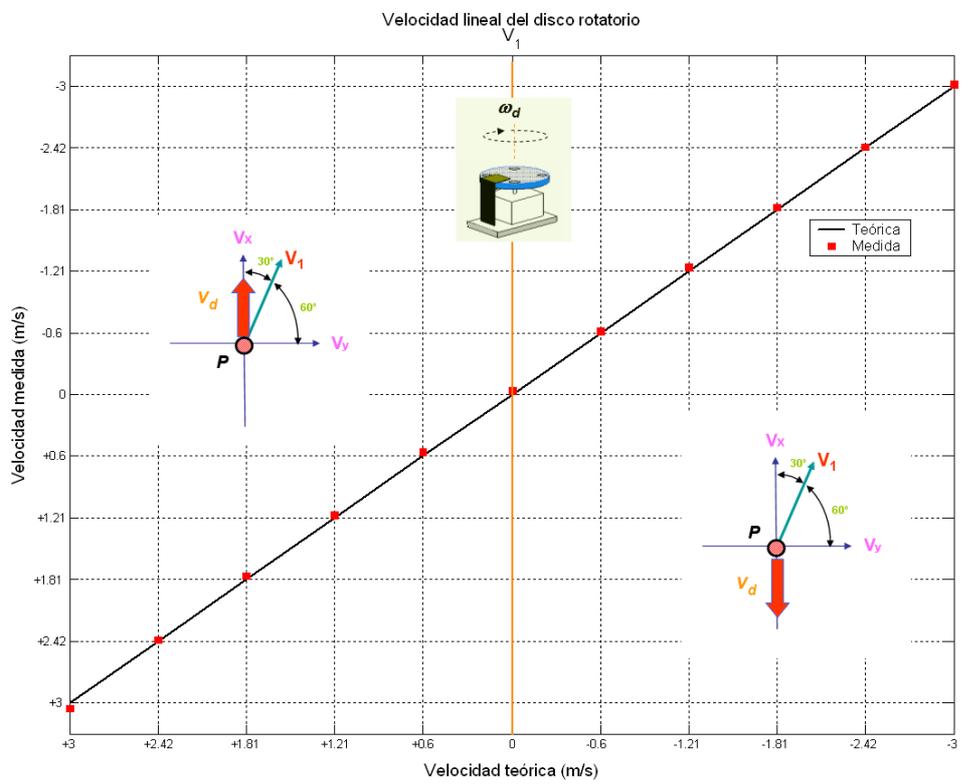


Figura 6.118 Medida de la componente de velocidad V_1 de la señal Doppler entre ± 3 m/s frente a la velocidad teórica

6.3. Agua en un circuito cerrado

Una vez que el sistema de medida de velocidad ha sido verificado en todo el margen de funcionamiento, y se han realizado diferentes medidas de velocidad de un blanco sólido (superficie rugosa), se presentan ahora medidas de la velocidad de un fluido.

Para presentar una serie de medidas sistemáticas de la velocidad del fluido la primera elección importante y fundamental es qué tipo de fluido vamos a medir. Por su disponibilidad y la posibilidad de realizar experimentos sencillos en circuitos cerrados, la mejor elección es utilizar algún tipo de líquido, y queda claro que el agua es el mejor candidato.

Se precisa de algún montaje que nos permita impulsar al flujo de agua de forma controlada, con accesibilidad para realizar las medidas y, en la medida de lo posible, de manera tal que pueda obtenerse algún perfil conocido de velocidades.

Uno de los experimentos más realizados por su sencillez, es la medida de la velocidad de agua corriente en un tubo de sección circular [SE79] [DMW76], donde el perfil o gradiente de velocidad teórico es conocido.

Se dispuso un circuito cerrado, formado por un recipiente con el fluido y una bomba de agua que lo hace circular por un tubo de plástico. Hemos utilizado una pequeña bomba de agua para peceras, con un regulador que permite variar el flujo del agua y forzar la circulación del fluido a velocidad constante.

Como vimos en la teoría general, lo que realmente vamos a detectar no serán las moléculas que forman el fluido, en este caso de agua, sino las impurezas que contenga. Para maximizar la intensidad de luz dispersada y mantener una buena cantidad de adquisiciones, la mejor opción es sembrar el fluido con partículas comerciales que faciliten las medidas. La elección del tipo de partículas se discute en el capítulo 5.

En nuestro caso, se utilizan partículas aproximadamente esféricas de Poliamida-12 (PSP-20), de diámetro entre 5 y $35\mu\text{m}$ Ref. 80A4011 de la empresa Dantec [Dyn02a].

6.3.1. Punto de medida

Una vez diseñado el circuito, necesitamos disponer de un punto de medida accesible por el medidor láser Doppler.

Recordemos que un sistema de este tipo, necesita disponer de una ventana de medida para que sea capaz de muestrear el fluido. Es decir, que la luz del medidor tiene que ser capaz de "ver" el fluido.

Como la medida se realizará en un punto cualquiera del circuito cerrado, la mejor opción será intercalar, en el camino de circulación del agua, una pieza que nos permita

introducir los haces láser Doppler dentro del fluido.

Con este propósito se construyó un pequeña pieza (manguito de medida), con sus caras anterior y posterior recubiertas por un material transparente (metacrilato) que permiten a la luz del medidor acceder al fluido que circula por él.

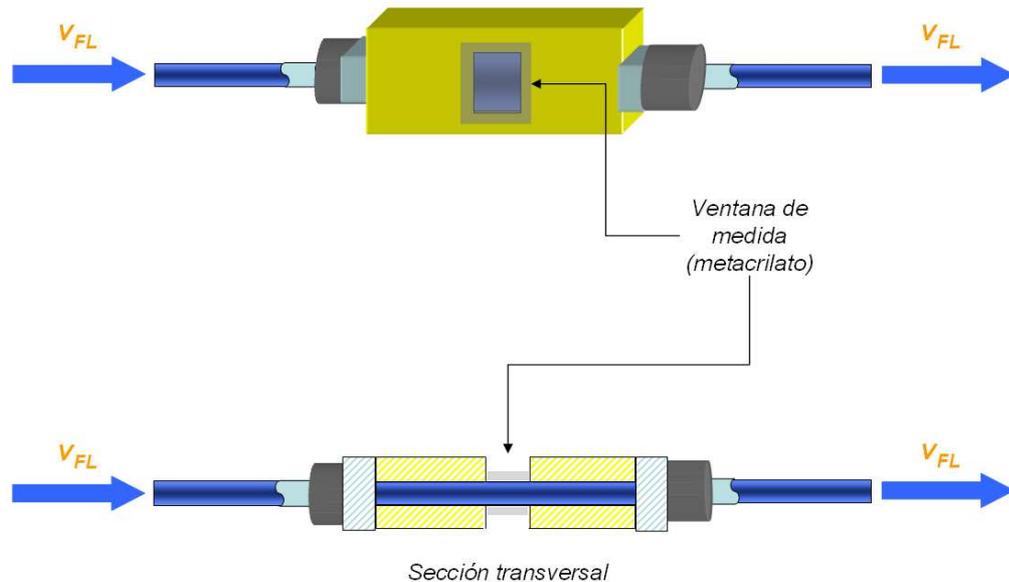


Figura 6.119 Manguito de medida

Las dimensiones del manguito, mecanizado en el taller mecánico del grupo de EEF, son de, aproximadamente, 7.5 cm de largo, con dos piezas roscadas en sus extremos para conectar el tubo de plástico de entrada y salida de agua, y de 2.5 cm de altura y profundidad. En la parte central de la pieza se encuentra la ventana de medida, con dos piezas de metacrilato en sus dos caras, formando un acceso o punto de entrada de 1 cm, que coincide con el diámetro del tubo.

Hay que destacar que, por motivos de mecanización, la ventana de medida no es de sección circular. Las paredes donde se han colocado las piezas de metacrilato, que permiten la entrada de los haces láser y la salida de la luz dispersada en dirección hacia delante (DHD), son planas y pegadas sobre el manguito de medida.

Este tipo de ventana nos va a facilitar la posibilidad de realizar medidas en sentido transversal a la dirección del fluido, en una serie de puntos del diámetro del manguito.

El principal inconveniente a tener en cuenta en este montaje es que, al no ser una pieza perfectamente circular, las medidas del perfil de velocidad que vamos a realizar no coincidirán exactamente con las que teóricamente deberíamos haber obtenido. Por otro

lado, tampoco podemos afirmar, y lo hemos podido comprobar experimentalmente, que la pequeña bomba de pecera utilizada genere un flujo contante de agua en todo instante de tiempo. A pesar de todo ello, el perfil de velocidad en un tubo de sección circular teórico podrá ser una muy buena referencia para confrontar con los valores obtenidos experimentalmente.

Es cierto que la mejor opción hubiese sido realizar medidas de velocidad con algún montaje hidrodinámico calibrado y comprobado con otras técnicas de medida, pero debido a la imposibilidad de trasladar la parte óptica del prototipo del sistema 2D-LDA, hemos creído que este tipo de comparación, sabiendo que para un blanco sólido funciona perfectamente, puede ser totalmente válido.

6.3.2. Montaje del experimento

En la figura 6.120 presentamos el esquema del montaje realizado para la medida de velocidad de agua en un circuito cerrado.

En un recipiente de metacrilato introducimos agua corriente y la pequeña bomba de pecera. Conectamos un tubo de plástico a la salida de la bomba para que el agua circule en un circuito cerrado y colocamos el manguito de medida aproximadamente a la mitad de su recorrido.

La bomba dispone de un regulador de flujo de líquido que nos permite ajustar la velocidad media del agua en el circuito cerrado.

Para poder realizar medidas a una velocidad mas o menos constante, hemos ajustado el regulador de flujo a la máxima velocidad, ya que en esta situación la velocidad del agua que atraviesa el manguito de medida se mantiene bastante constante a lo largo del tiempo de medida.

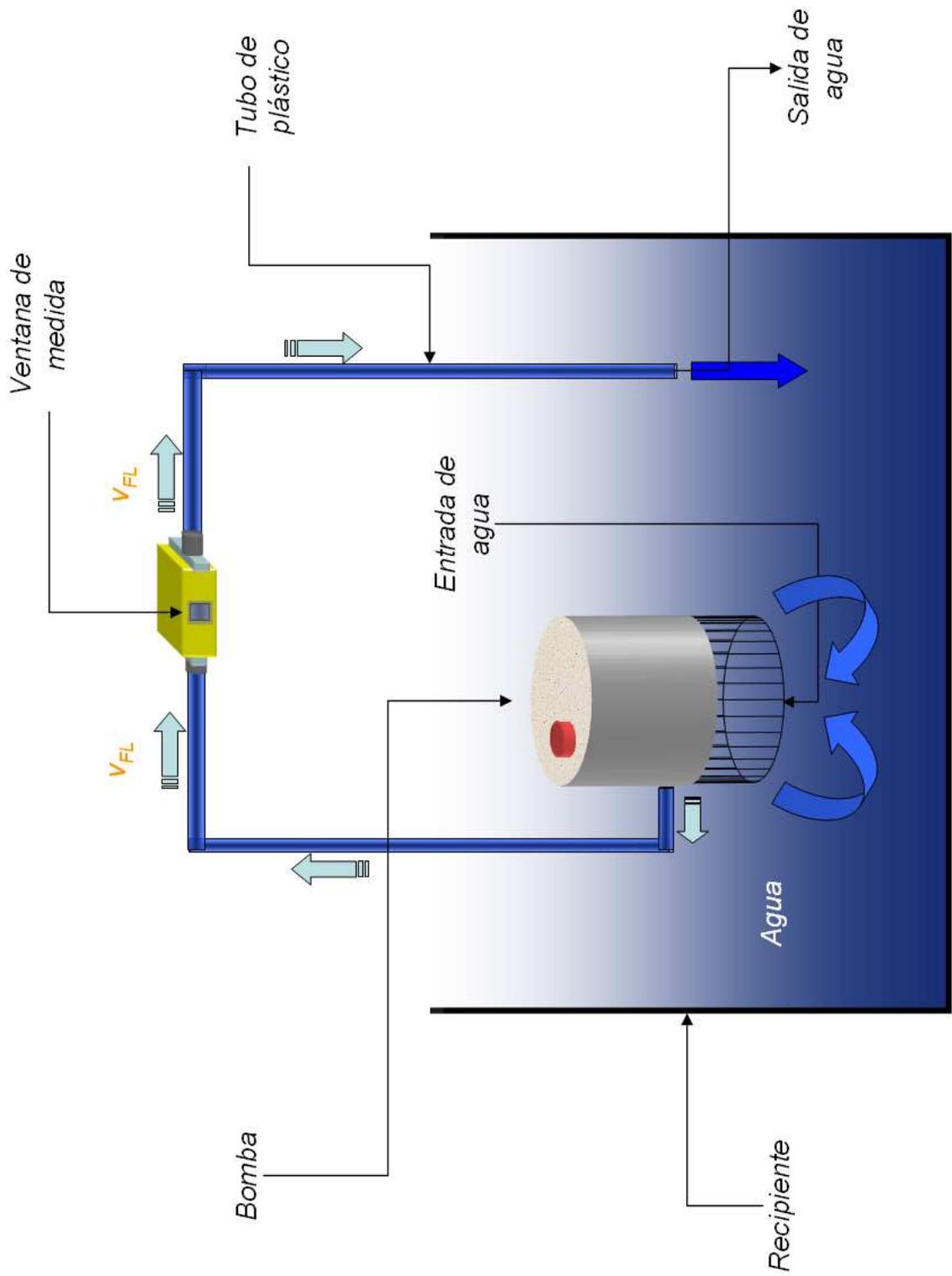


Figura 6.120 Esquema del montaje utilizado para la medida de la velocidad de agua en un circuito cerrado

6.3.3. Gradiente o perfil de velocidad en el interior de un tubo

Si consideramos el movimiento de un fluido real viscoso por un tubo de sección circular [Vic78] [FP83], en el caso en que podamos descomponerlo en capas o cilindros coaxiales caracterizados cada uno de ellos por una velocidad determinada, paralela al tubo, "resbalando" una sobre otras, diremos que se mueve en régimen laminar o de *Poiseuille*.

En este caso, en la capa en contacto con las paredes del tubo se tendrá velocidad nula, mientras que a medida que nos acercamos al eje del tubo irá aumentando la velocidad hasta su valor máximo.

En definitiva, el gradiente de velocidad en función de la distancia radial r_t corresponde a una parábola, como se ha representado en las figuras 6.121 y 6.122, de la forma

$$\frac{V_{FL}}{V_{FLmax}} = 1 - \frac{r_t^2}{a_t^2} \quad (6.8)$$

donde V_{FL} es la velocidad del fluido, V_{FLmax} la velocidad en el eje del tubo, a_t el radio del tubo y r_t la distancia radial.

El régimen laminar sólo será estable a velocidades relativamente pequeñas. A velocidades superiores a un cierto valor crítico, aparecen a veces pares de fuerzas interiores que producen rotaciones dentro de la masa líquida en movimiento de traslación, es decir, las líneas de corriente dejan de ser paralelas al eje del tubo formándose remolinos que mezclan el líquido próximo a las paredes con el existente, en un instante, en la proximidad del eje. En este caso se dice que el fluido está en régimen turbulento o de *Venturi*.

La velocidad crítica dependerá de la naturaleza del líquido y del radio del tubo de sección circular. Así, se define una magnitud abstracta y adimensional, conocido como número de *Reynolds*, que viene dado por la siguiente expresión

$$R_e = \frac{2 \cdot Vm_{FL} \cdot a_t \cdot \rho}{\eta} \quad (6.9)$$

con Vm_{FL} es la velocidad media equivalente, que se obtiene dividiendo el gasto por la sección del tubo, ρ la densidad del líquido y η su coeficiente de viscosidad. Si R_e es inferior a 2400, el régimen turbulento no puede persistir y estaremos en régimen laminar, cumpliendo con la ecuación (6.8) de movimiento.

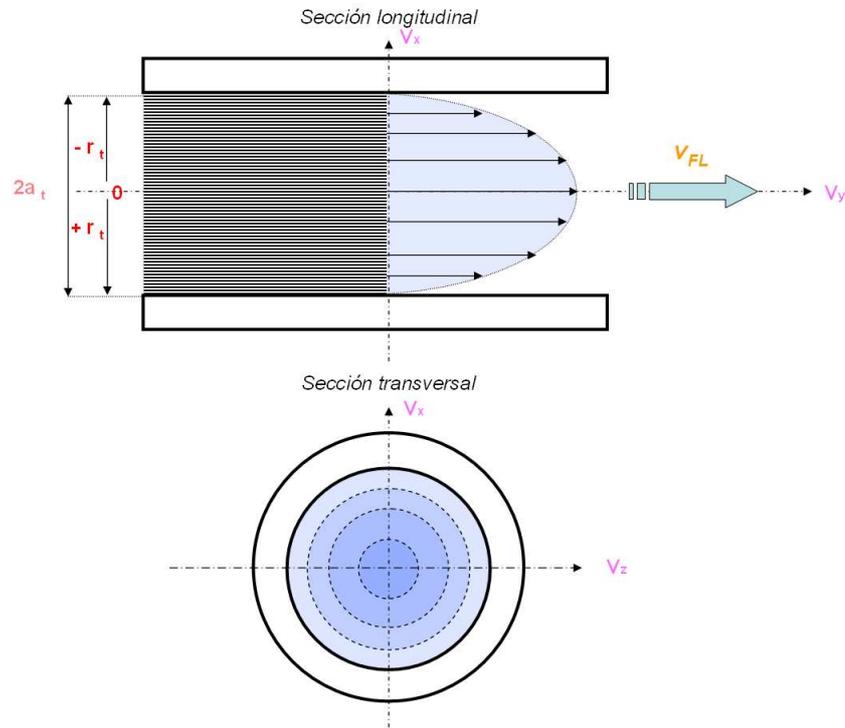


Figura 6.121 Circulación laminar por un tubo. Distribución de velocidades.

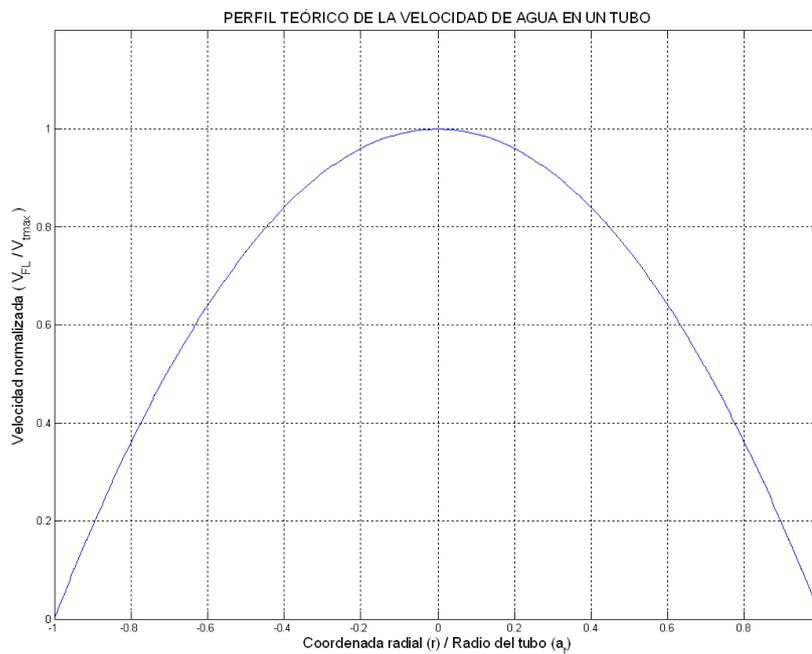


Figura 6.122 Perfil de velocidades de la sección longitudinal.

Si R_e es superior a 4000 estaremos en régimen turbulento, apareciendo remolinos y movimientos no paralelos al eje del tubo.

En la zona intermedia $2400 < R_e < 4000$, el comportamiento del fluido será una mezcla del régimen laminar y turbulento, con un perfil de velocidad aproximadamente parabólico pero totalmente inestable, y donde aparecen turbulencias difíciles de predecir.

En el caso de agua a una temperatura de 20°C ($\eta = 10^{-3}\text{Pas}$ y $\rho = 1000\text{Kgr}/\text{m}^3$) en un tubo de 0.5cm de radio, a una velocidad media de unos 0.3 m/s aproximadamente, calculada empíricamente, substituyendo en la ecuación (6.9) obtenemos que el número de *Reynolds*, en nuestras condiciones de experimentación, es

$$R_e \simeq 3000 \quad (6.10)$$

En este caso queda claro que estaremos en la zona intermedia de los regímenes laminar y turbulento, apareciendo un comportamiento aproximadamente parabólico con ciertas oscilaciones o turbulencias en su perfil.

6.3.4. Puntos de medida del fluido

Las componentes de velocidad que detectará el prototipo 2D-LDA dentro del manguito a través de la ventana de medida (V_1 y V_2), las presentamos en la figura 6.123.

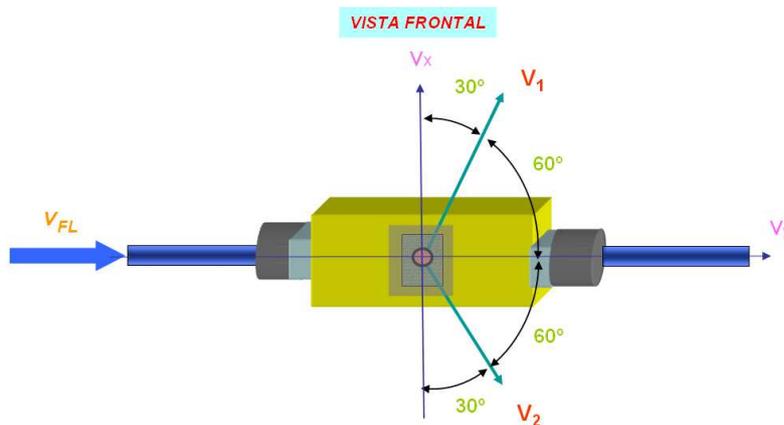


Figura 6.123 Manguito de medida

Las diferentes medidas del perfil de velocidad en dirección del eje Y , nos permitirá obtener el gradiente de velocidad calculado teóricamente en el apartado anterior y comparar los resultados con los obtenidos en la gráfica de la figura 6.122. Una mejor

vista de la posición de los puntos de medida realizados en el tubo circular se muestran en la figura 6.124.

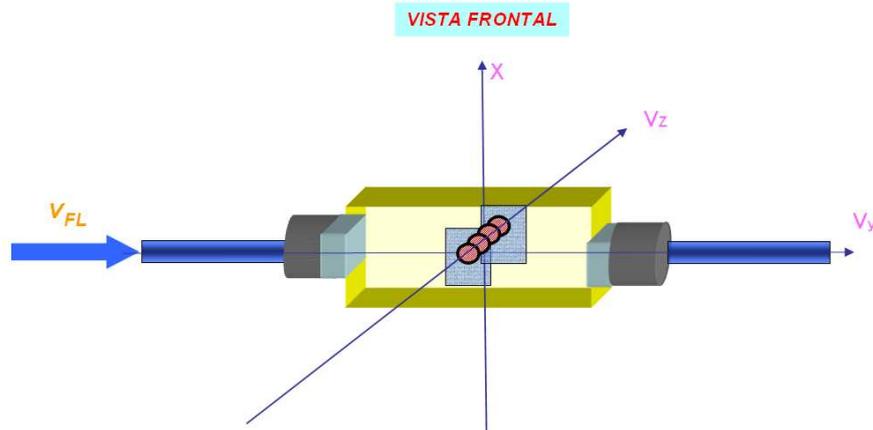


Figura 6.124 Situación de los puntos de medida

Definidos la situación de los puntos de medida, vamos a realizar medidas en nueve puntos diferentes a lo largo del diámetro del tubo, definidos como P_i ($i=1,2,\dots,9$), sobre el eje Z .

Cuadro 6.3 Posición de los puntos de medida

	$z=r_t$ (mm)	r_t/a_t (mm)
P_1	-4	-0.8
P_2	-3	-0.6
P_3	-2	-0.4
P_4	-1	-0.2
P_5	0	0
P_6	1	0.2
P_7	2	0.4
P_8	3	0.6
P_9	4	0.8

Las componentes de velocidad V_1 y V_2 , en cada punto P_i , serán positivas, y a partir de la relación entre estas componentes y la componente ortogonal presentadas en el apartado 4.3.10, obtendremos la velocidad del fluido V_{FL} que coincidirá con la componente de velocidad V_y , en función de la distancia radial r_t definida en la figura 6.121. El esquema general lo presentamos en la figura 6.125.

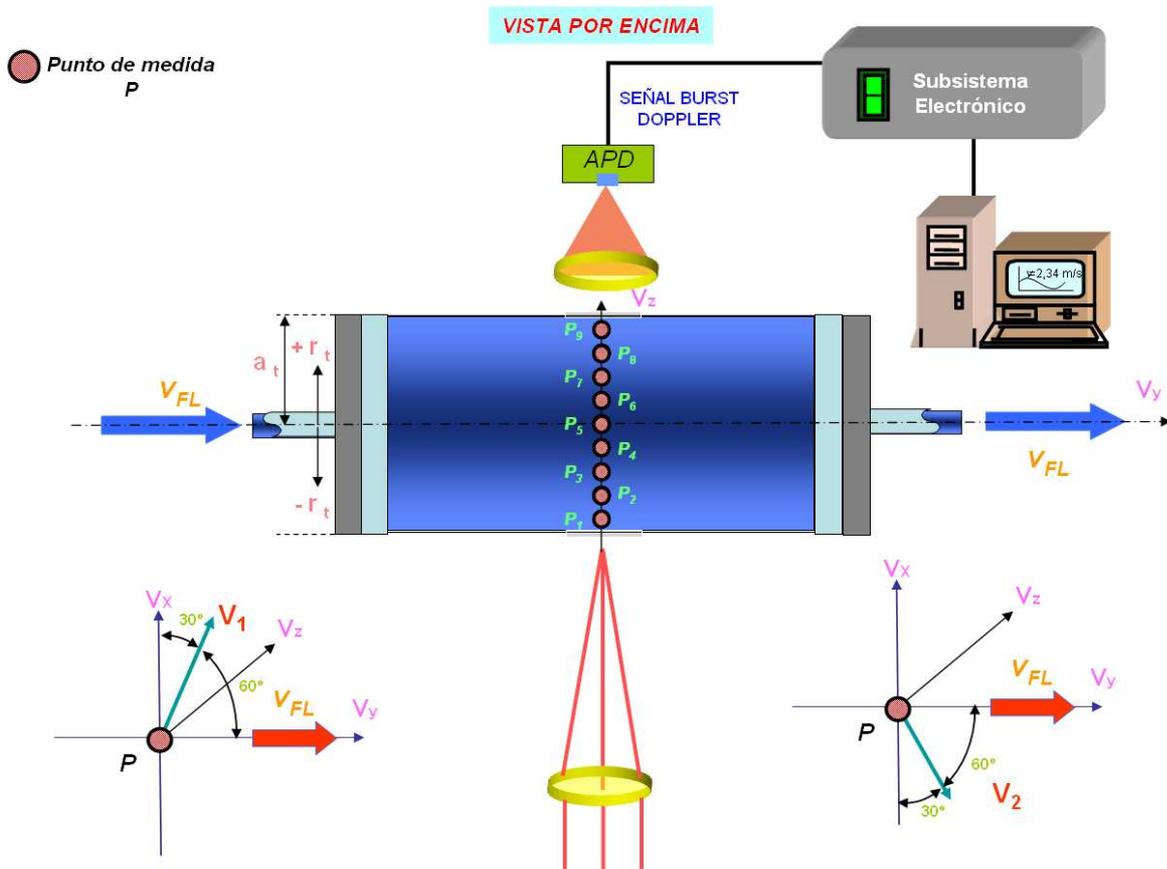


Figura 6.125 Esquema general del experimento hidrodinámico de la medida del gradiente de velocidad en un tubo circular, indicando los puntos de medida y componentes de velocidad detectadas sobre el manguito

6.3.5. Velocidad máxima del fluido

La medida en el punto central del tubo, P_5 , nos va a servir para presentar las características de la medida en un fluido. Se ha elegido este punto y no otro, por el hecho de coincidir con la velocidad máxima del perfil en toda la distancia radial del tubo.

En las figuras 6.126 y 6.127 se muestran los resultados obtenidos para los desplazamientos frecuenciales asociados a las dos componentes de velocidad V_2 y V_1 , en una serie de 2000 medidas.

No todas las medidas tendrán suficiente calidad. Vimos que la única manera de saber si una medida es correcta o no, consiste en determinar si el pico máximo frecuencial puede ser discriminado en relación a la amplitud del segundo pico, lo que viene descrito por el parámetro NLPS (relación de lóbulo principal a secundario). Dependerá principalmente del ruido, enventanado de los datos, reflejos interferentes, tamaño de las partículas y posibles errores sistemáticos del subsistema de procesamiento de señal.

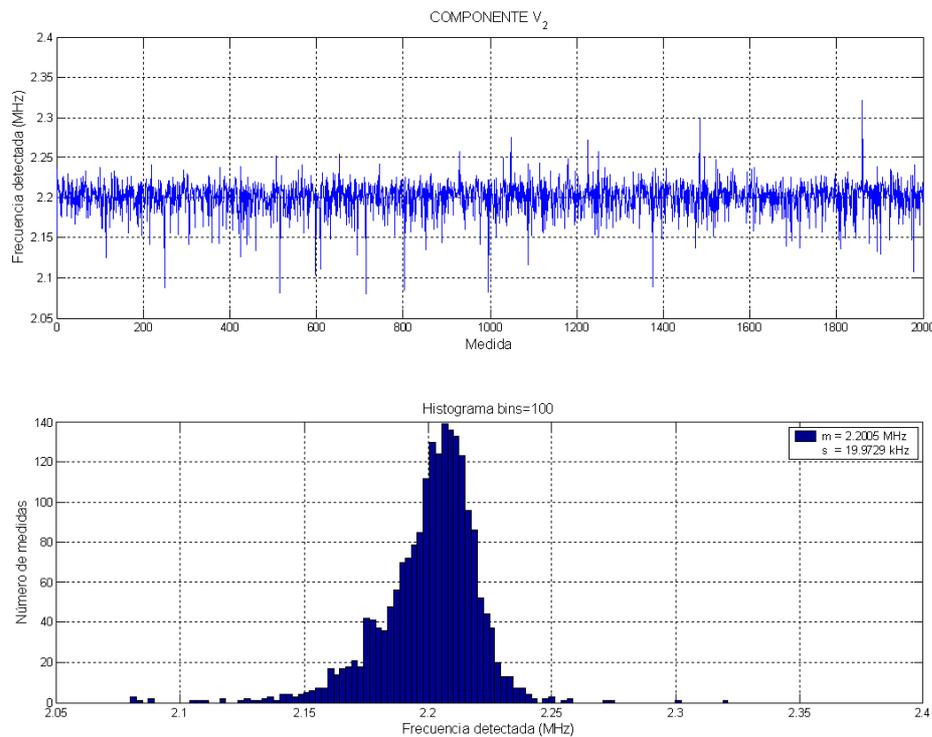


Figura 6.126 Medidas de la componente de velocidad V_2 de agua en un circuito cerrado, en el punto P_5 (valores e histograma)

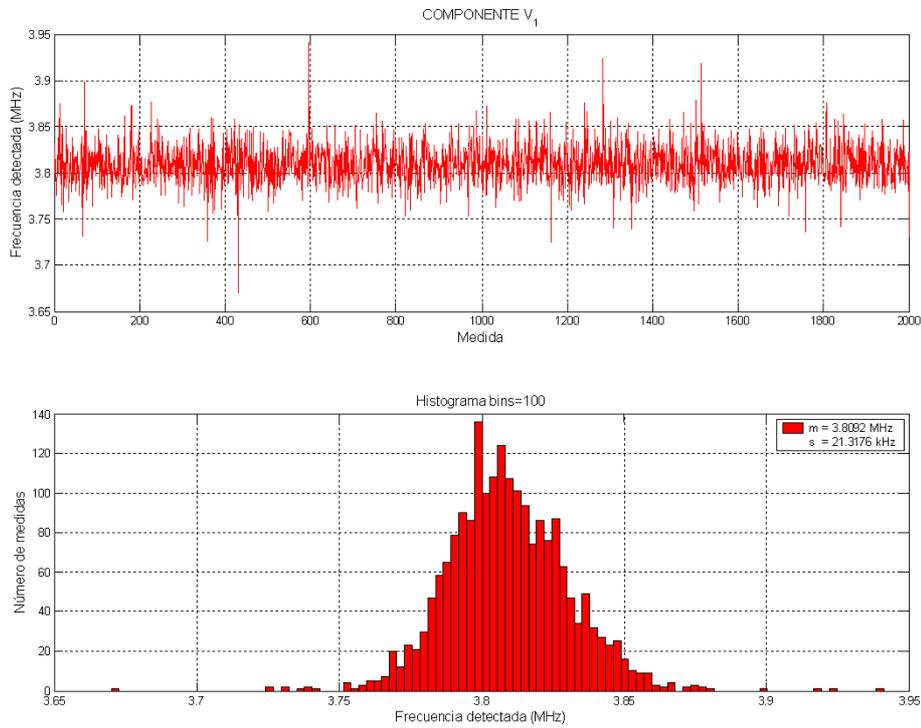


Figura 6.127 Medidas de la componente de velocidad V_1 de agua en un circuito cerrado, en el punto P_5 (valores e histograma)

De las medidas realizadas podemos observar que, promediando todos los datos, sin discriminar ninguna de ellas, obtenemos los siguientes valores de frecuencia (media y desviación típica) de las componentes de velocidad

$$f_1|_{P_5} \simeq 3,809MHz \quad s_1|_{P_5} \simeq 21,31kHz \quad (6.11)$$

$$f_2|_{P_5} \simeq 2,20MHz \quad s_1|_{P_5} \simeq 19,97kHz \quad (6.12)$$

y si las expresamos en valores de velocidad tenemos

$$V_1|_{P_5} \simeq 1,21m/s \quad s_1|_{P_5} \simeq 12cm/s \quad (6.13)$$

$$V_2|_{P_5} \simeq 1,21m/s \quad s_1|_{P_5} \simeq 12cm/s \quad (6.14)$$

Si ahora convertimos las componentes de velocidad detectadas por el anemómetro Láser Doppler en las componentes de velocidad ortogonales definidas en el eje X (V_x), y

en el eje Y (V_y), definidas en las ecuaciones (4.51) y (4.52) del apartado 4.3.10 obtenemos

$$V_x|_{P_5} = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot V_1|_{P_5} - \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot V_2|_{P_5} \quad (6.15)$$

$$V_y|_{P_5} = V_1|_{P_5} + V_2|_{P_5} \quad (6.16)$$

substituyendo en las ecuaciones anteriores los valores de las ecuaciones (6.13) y (6.14)

$$V_x|_{P_5} \simeq 0m/s \quad s_x|_{P_5} \simeq 17cm/s \quad (6.17)$$

$$V_y|_{P_5} \simeq 2,42m/s \quad s_y|_{P_5} \simeq 17cm/s \quad (6.18)$$

Como era de prever, el fluido en el experimento se mueve en dirección al eje Y , sin componente en el eje X , y por eso la velocidad V_y es de 2.42 m/s en el punto de medida P_5 que coincide con el eje del tubo de sección circular.

Las variaciones de velocidad en las dos componentes indican no solo el error implícito de todos los subsistemas electrónicos, adquisición y estimación espectral, sino también las posibles turbulencias en el medio de propagación.

6.3.6. Espectro de una señal producida por una partícula

Para poder observar un espectro típico de una señal Doppler que se ha producido por el paso de una partícula por la zona de medida en el fluido, presentamos un caso cualquiera en función del orden del *zero-padding* $n_{zp} = 0$, $n_{zp} = 1$ y $n_{zp} = 2$. La resolución en la estimación de los picos espectrales es progresivamente mayor, mejorando el resultado.

Los espectros, presentados en la figuras 6.128, 6.129 y 6.130 provienen de partículas que generan niveles suficientes para poder ser tomadas como medidas válidas. Según el criterio adoptado de decisión -que se alcance un valor suficiente del parámetro NLPS- es posible distinguir con claridad los picos frecuenciales en las ventanas de trabajo de las dos componentes Dopplers, V_1 entre las frecuencia de 1.5MHz y 2.5MHz, y para V_2 entre 3.5MHz y 4.5MHz. En este caso particular, el NLPS obtenido es aproximadamente de 5 y 10 dB.

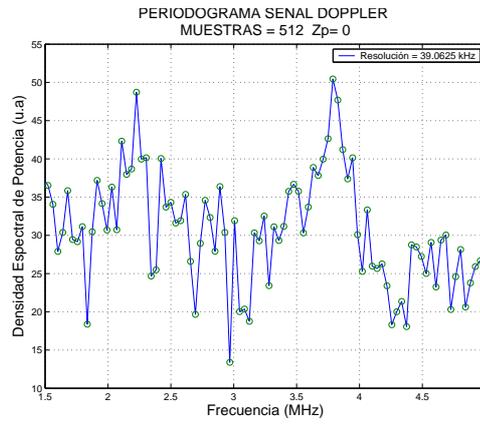


Figura 6.128 Espectro de la señal Doppler con 512 muestras y zero-padding $n_{zp} = 0$

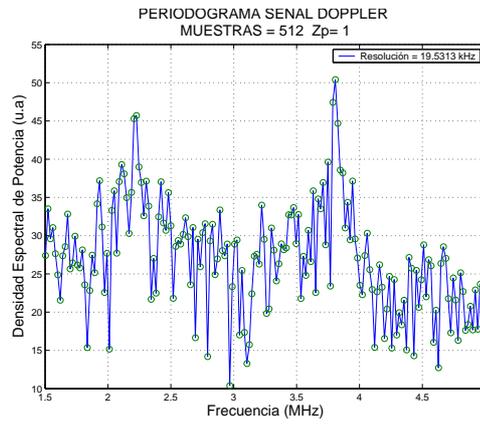


Figura 6.129 Espectro de la señal Doppler con 512 muestras y zero-padding $n_{zp} = 1$

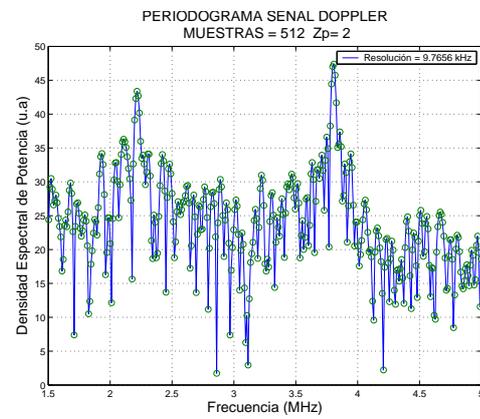


Figura 6.130 Espectro de la señal Doppler con 512 muestras y zero-padding $n_{zp} = 2$

6.3.7. Valores de NLPS

El parámetro de mayor interés es la elección del valor mínimo de NLPS de cada señal Doppler, que deberá servir de umbral para dar validez a las medidas.

Para conocer qué niveles de NLPS podemos obtener durante un proceso de captura de datos, se presentan las gráficas de la NLPS de una serie de 2000 medidas para cada una de las dos componentes V_1 , en la figura 6.131, y V_2 en la figura 6.133.

Vemos perfectamente que los valores son muy dispersos, entre un valor mínimo de 0 dB (señal totalmente ruidosa e imposible de detectar el pico Doppler) hasta niveles extremadamente elevadas, con NLPS de hasta unos 35 dB.

En este caso particular, disponemos de un valor medio de NLPS para estas 2000 muestras, de aproximadamente 17 dB con una desviación típica en frecuencia de unos 17kHz.

La justificación del porqué de esta gran variación reside en la diversidad de tamaños de partículas y de sus posibles trayectorias. Recordemos que cuando una partícula de tamaño pequeño cruza la zona de medida genera poca energía, mientras que cuando cruza una partícula grande la señal recibida se incrementa. Pero además de la importancia del tamaño, lo que interesa es la trayectoria que realiza la partícula por la zona de dispersión. En el caso que cruce exactamente por el centro de la zona de interferencias, la energía dispersada y el número de franjas atravesadas se incrementará, obteniendo una mejor estimación de la frecuencia Doppler. Si por el contrario tenemos una partícula que cruza por un lateral del volumen de medida, no solo la energía dispersada será pobre, sino que cruzará pocas franjas y por tanto la estimación espectral será peor.

Además de estas dos gráficas, se muestra el número de medidas válidas que vamos a obtener en función del NLPS mínimo, en las figuras 6.132 y 6.134. Evidentemente, cuanto más restrictivos seamos, menos muestras válidas obtendremos, aunque menor error se producirá.

Para finalizar este apartado, presentamos que ocurrirá con la precisión de la medida de la frecuencia (velocidad) en función del número de medidas, obteniendo los valores medios de las dos componentes y su desviación típica (figuras 6.135, 6.136, 6.137 y 6.136), o en función del valor del NLPS (figuras 6.139, 6.140, 6.141 y 6.142). Vemos que los errores van disminuyendo cuando aumentamos el número de medidas y cuando aumentamos el NLPS mínimo.

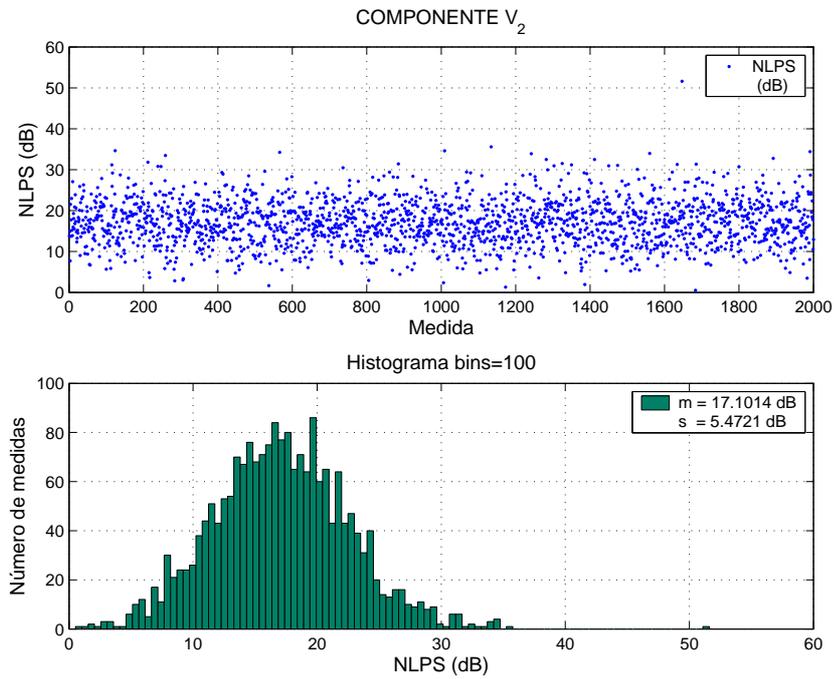


Figura 6.131 Relación lóbulo principal a secundario (NLPS) de una serie de 2000 medidas del espectro de la componente de velocidad V_2 de agua en un circuito cerrado

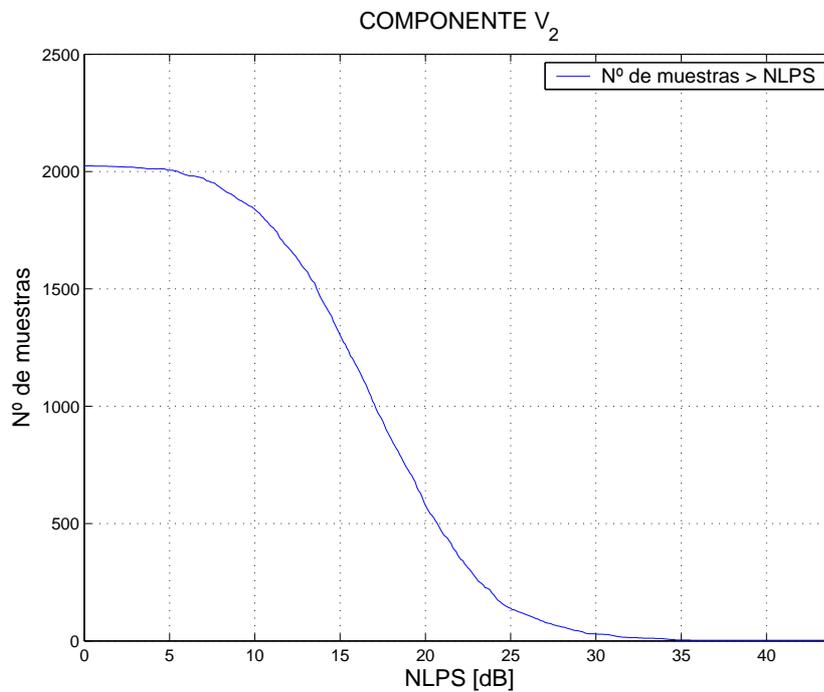


Figura 6.132 Número de muestras capturadas que superan la relación lóbulo principal a secundario (NLPS) de una serie de 2000 medidas del espectro de la componente de velocidad V_2 de agua en un circuito cerrado

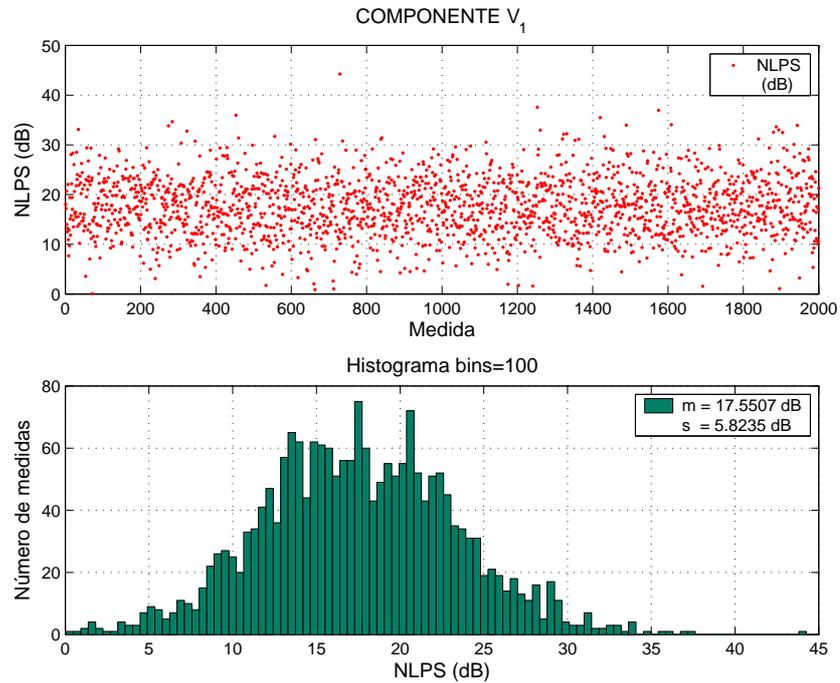


Figura 6.133 Relación lóbulo principal a secundario (NLPS) de una serie de 2000 medidas del espectro de la componente de velocidad V_1 de agua en un circuito cerrado

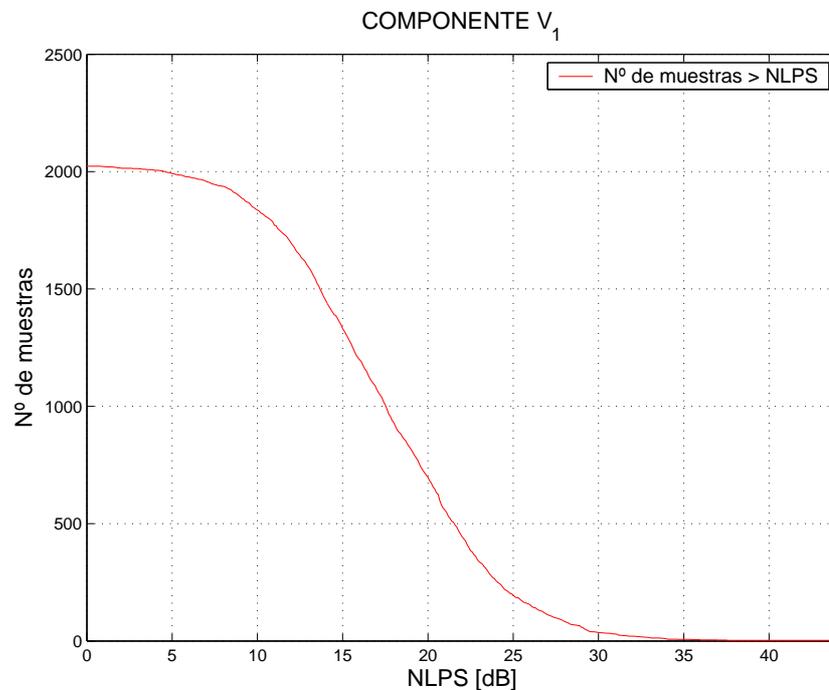


Figura 6.134 Número de muestras capturadas que superan la relación lóbulo principal a secundario (NLPS) de una serie de 2000 medidas del espectro de la componente de velocidad V_1 de agua en un circuito cerrado

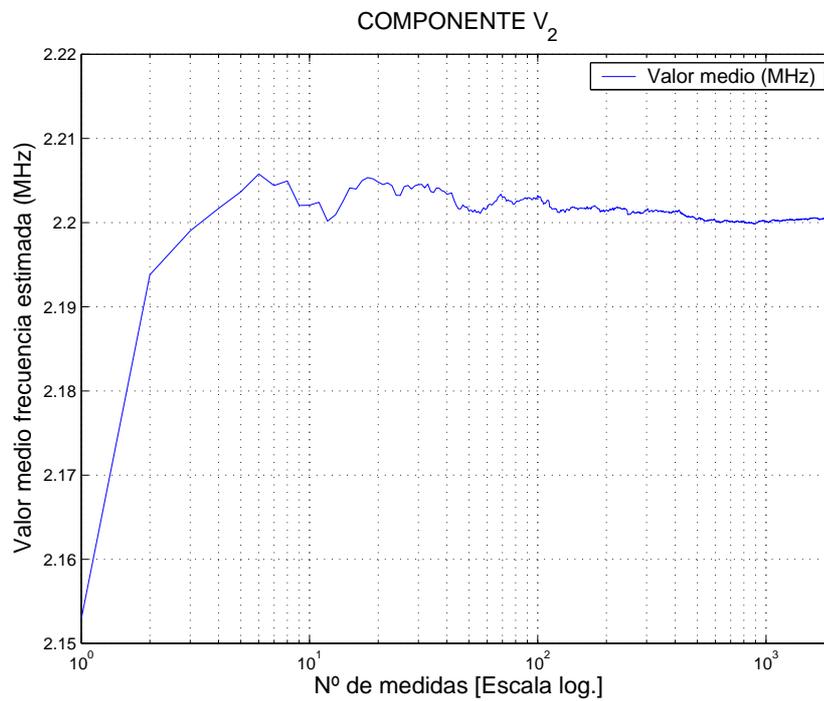


Figura 6.135 Valor medio de V_2 en función del número de medidas realizadas

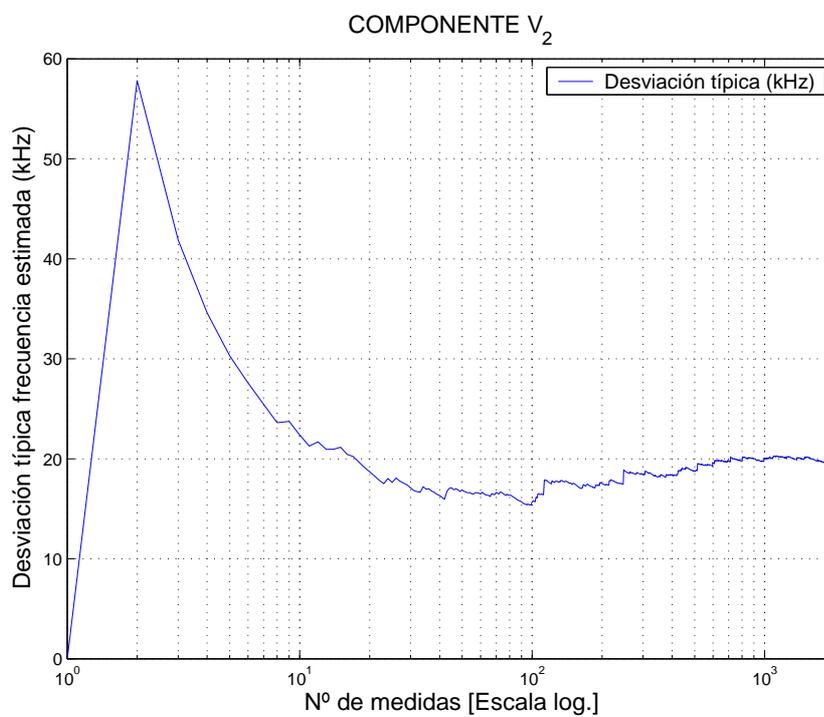


Figura 6.136 Desviación típica en la medida de V_2 en función del número de medidas realizadas

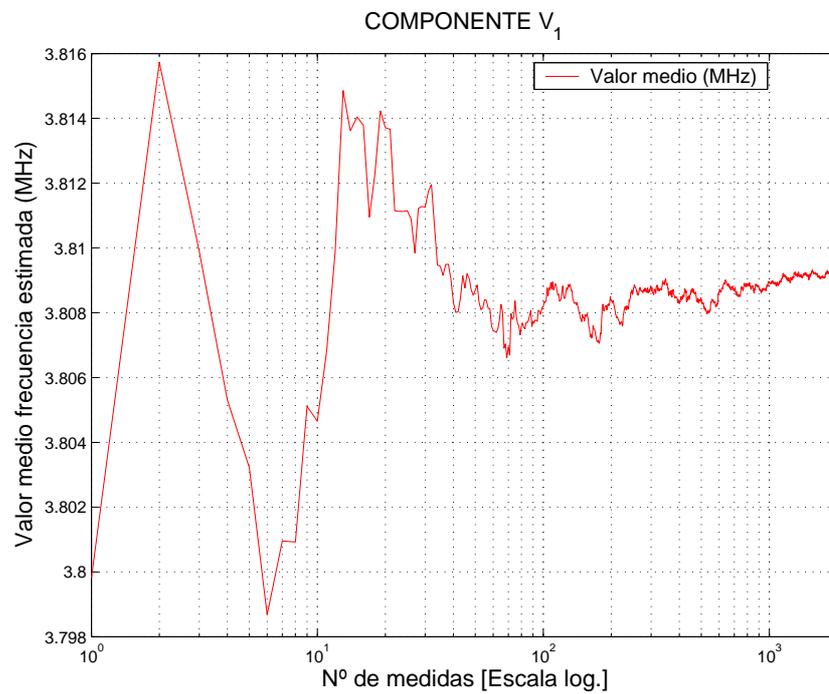


Figura 6.137 Valor medio de V_1 en función del número de medidas realizadas

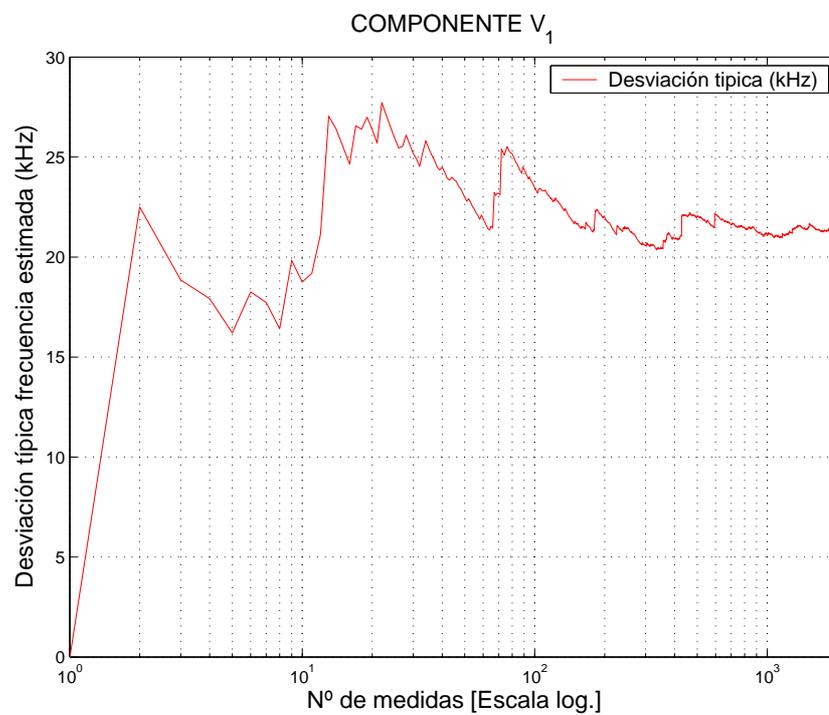


Figura 6.138 Desviación típica en la medida de V_1 en función del número de medidas realizadas

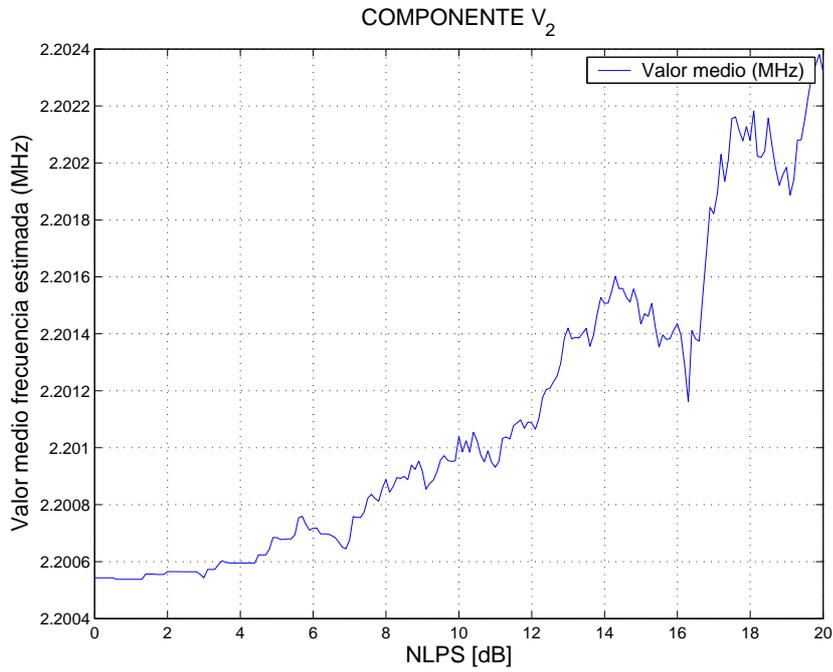


Figura 6.139 Valor medio de la componente de velocidad V_2 en función del NLPS mínimo aceptable, de agua en un circuito cerrado

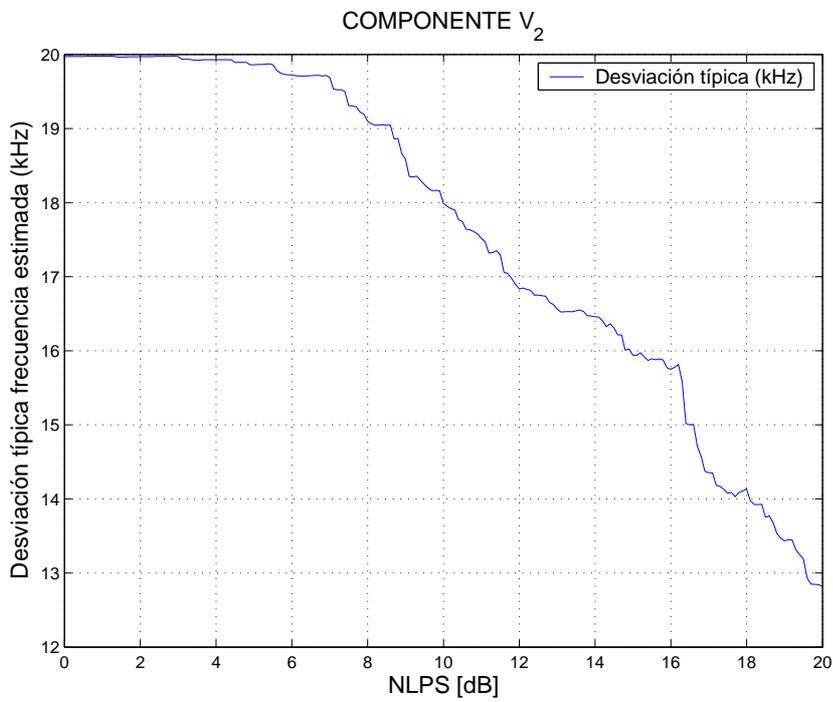


Figura 6.140 Desviación típica de la componente de velocidad V_2 en función del NLPS mínimo aceptable, de agua en un circuito cerrado

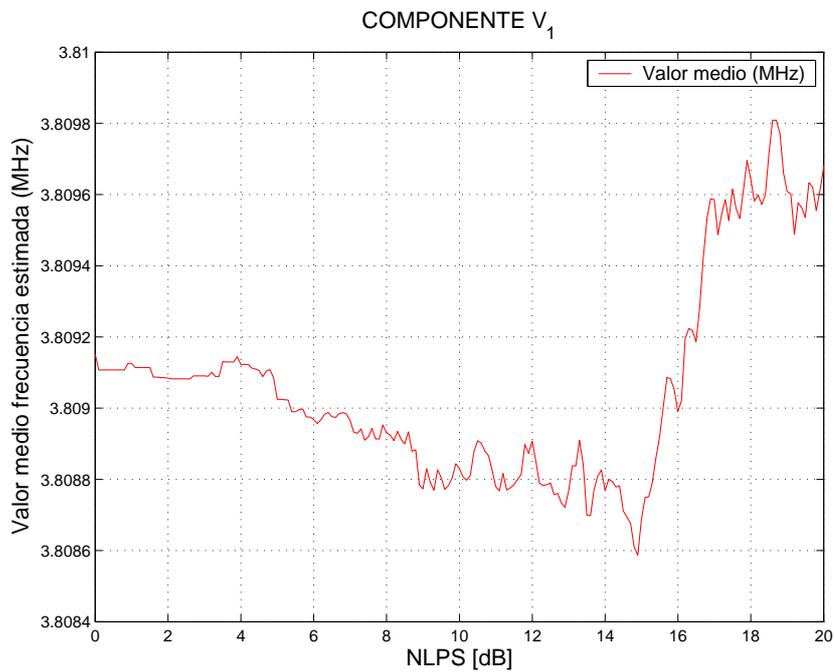


Figura 6.141 Valor medio de la componente de velocidad V_1 en función del NLPS mínimo aceptable, de agua en un circuito cerrado

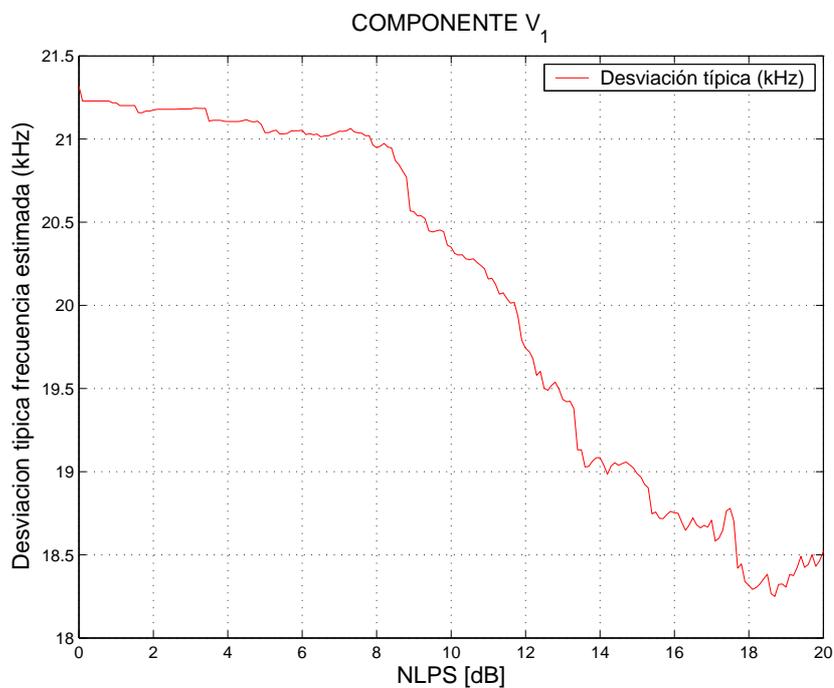


Figura 6.142 Desviación típica de la componente de velocidad V_1 en función del NLPS mínimo aceptable, de agua en un circuito cerrado

6.3.8. Medidas finales del gradiente de velocidad del tubo de agua

Para finalizar, se presentan las medidas realizadas del perfil o gradiente de velocidad del tubo de sección circular, circulando por su interior agua corriente, en función de la componente radial r_t en todo el diámetro del tubo.

De las medidas realizadas en los nueve puntos presentados en la figura 6.125, a lo largo del eje Z , obtendremos los valores de la velocidad media $V_y = V_{FL}$ de 2000 medidas capturadas y de su desviación típica en cada punto.

Vimos que lo que disminuye el error en la estimación de la señal Doppler, aparte del NLPS del espectro, es el número de disparos de inicio de captura que podía generar una señal Doppler.

El objetivo, explicado en el apartado 4.8, era capturar aquellas muestras de la señal que tuviesen una mejor SNR, y por tanto mejor NLPS en el espectro. Queda claro que la mejor opción sería obtener señales que generasen cuatro disparos, frente al peor que sería un solo disparo (situación habitual en otros sistemas de captura de datos).

En atención a esas consideraciones se han agrupado las medidas también de acuerdo con el número de disparos que produjeron. El caso teóricamente óptimo será el de las capturas obtenidas con cuatro disparos. El peor, el de aquellos que sólo provocaran un disparo.

En la tabla 6.4, presentamos los resultados obtenidos en cada punto del tubo y en las figuras 6.143 y 6.144 la evolución de la velocidad en función de la distancia radial y su desviación típica, para el caso de uno y cuatro disparos.

Cuadro 6.4 Medidas de la velocidad media y desviación típica de 2000 medidas en diferentes puntos de un tubo de agua en un circuito cerrado

	r_t (mm)	r_t/a_t (mm)	V_{FL}/V_{max} 1 disparo	V_{FL}/V_{max} 4 disparos	s (m/s) 1 disparo	s (m/s) 4 disparos
	P_1	-4	-0.8	0.44203	0.44435	0.3362
P_2	-3	-0.6	0.78263	0.76483	0.25688	0.21979
P_3	-2	-0.4	0.87162	0.86871	0.26757	0.16736
P_4	-1	-0.2	0.9504	0.9502	0.12897	0.11488
P_5	0	0	1	1	0.17384	0.08665
P_6	1	0.2	0.97029	0.97652	0.20577	0.08349
P_7	2	0.4	0.84247	0.86626	0.26109	0.17126
P_8	3	0.6	0.71289	0.72115	0.35764	0.28541
P_9	4	0.8	0.43569	0.38125	0.12642	0.11105

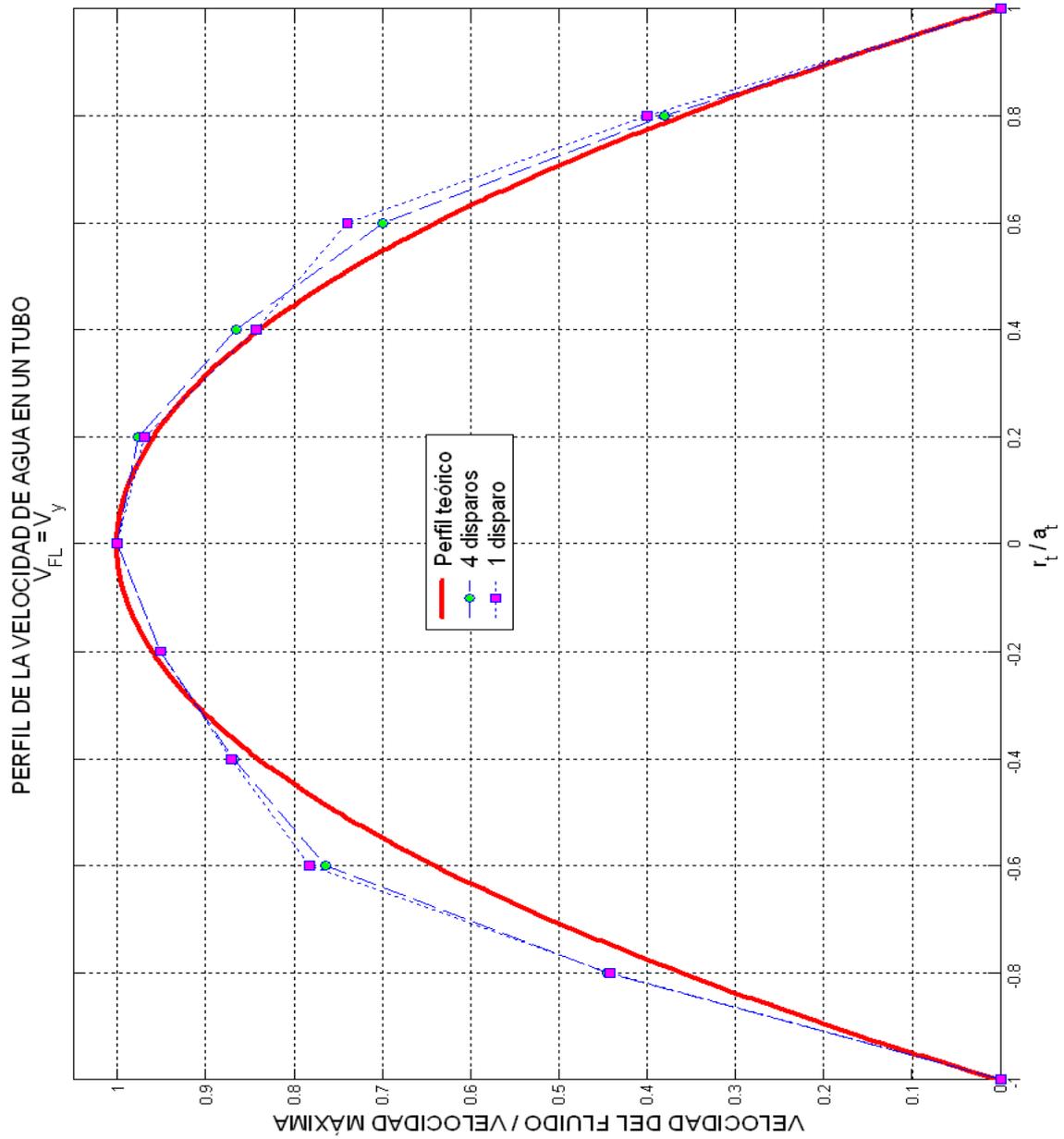


Figura 6.143 Medidas del perfil de velocidad de agua por un tubo de sección circular

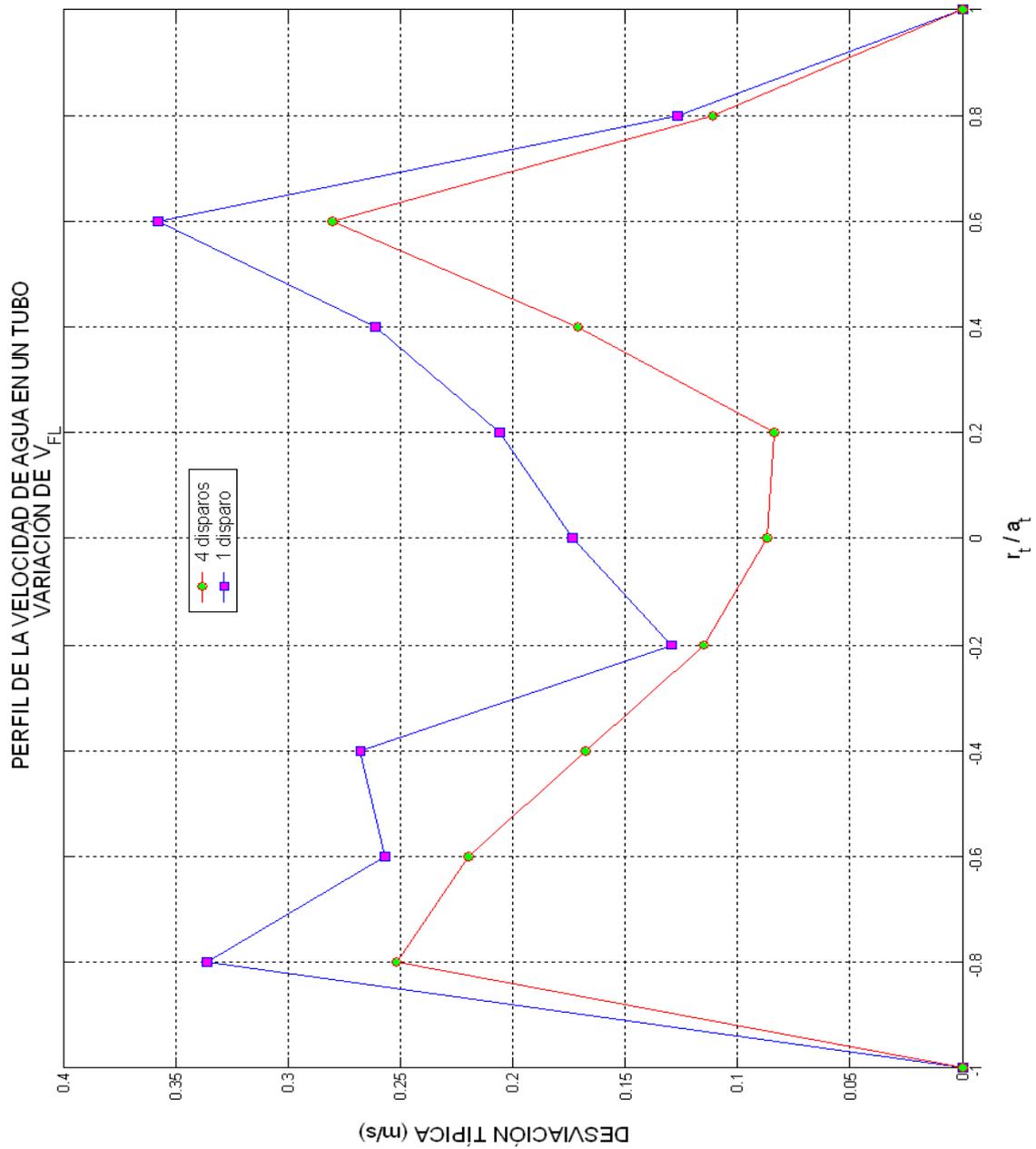


Figura 6.144 Medidas de la variación (desviación típica) del perfil de velocidad de agua por un tubo de sección circular

De los resultados obtenidos en las figuras anteriores podemos extraer las siguientes conclusiones:

1. EL perfil de velocidad real obtenido por el prototipo del sistema 2D-LDA, confirma la evolución parabólica con ciertas oscilaciones o turbulencias en los resultados. Esto coincide con la teoría del experimento hidrodinámico, ya que en nuestro caso el número de *Reynolds* era de $R_e \simeq 3000$, y eso supone que debe esperarse un régimen laminar pero con pequeñas turbulencias.
2. De los resultados mostrados en las gráficas 6.135 y 6.137 -velocidad media en función del número de medidas promediadas- se observa que con unas 100 medidas la variación de la medida queda por debajo del 0.11% en la componente con más variación. Obsérvese que en cualquier caso las variaciones de velocidad son mínimas para casi cualquier número de medidas realizadas.
3. Si la conclusión anterior es cierta se comprobaría que pueden realizarse medidas muy precisas promediando un número muy pequeño de medidas individuales, o quizás incluso, sin promediar. Esto posibilitaría que el sistema fuese capaz de seguir en tiempo real la evolución de flujos altamente turbulentos.
4. Las desviaciones típicas mostradas en función del número de medidas -figuras 6.138 y 6.136- resultan igualmente pequeñas (obsérvese que se dan unidades de kHz). No obstante la medida de la componente V_1 presenta mayor variabilidad. Esto podría estar relacionado con algún desequilibrio en cuanto a la potencia óptica de los tres haces y a su eficiencia de la formación de las franjas.
5. De las figuras 6.139 y 6.141 deduce que las medidas son mejores cuanto más exigentes nos mostramos en la elección del NLPS mínimo. Sin embargo no debe olvidarse que esto supone la eliminación de muchas adquisiciones, con la consiguiente pérdida de velocidad de medida.
6. Las figuras 6.143 y 6.144 muestran que las señales se suficiente amplitud como para producir cuatro disparos son mejores que otras más pequeñas. Esto era un resultado previsible.
7. Las variaciones de la velocidad en los diferentes puntos de medida, caracterizadas por su desviación típica, aumentan en las zonas del tubo más próximas a las paredes, mientras que en el centro la estimación tiene menor variación. Esto podría ser debido a que el fluido es, relativamente, más turbulento en esas regiones que en la zona central.

