

Análisis del Ruido en el Sensor de Altura Producido por las Vibraciones del Motor de la Calle de Selección

La señal analógica leída por el controlador S7200 de la Estación de Clasificación contiene ruido debido a las vibraciones que genera el motor de la calle de selección cuando está encendido.

En la Figura 1 se muestra la lectura del sensor de altura con el motor de la calle de selección encendido y apagado. El experimento se realizó durante 15 minutos con intervalo de muestreo de 1 segundo (900 muestras).

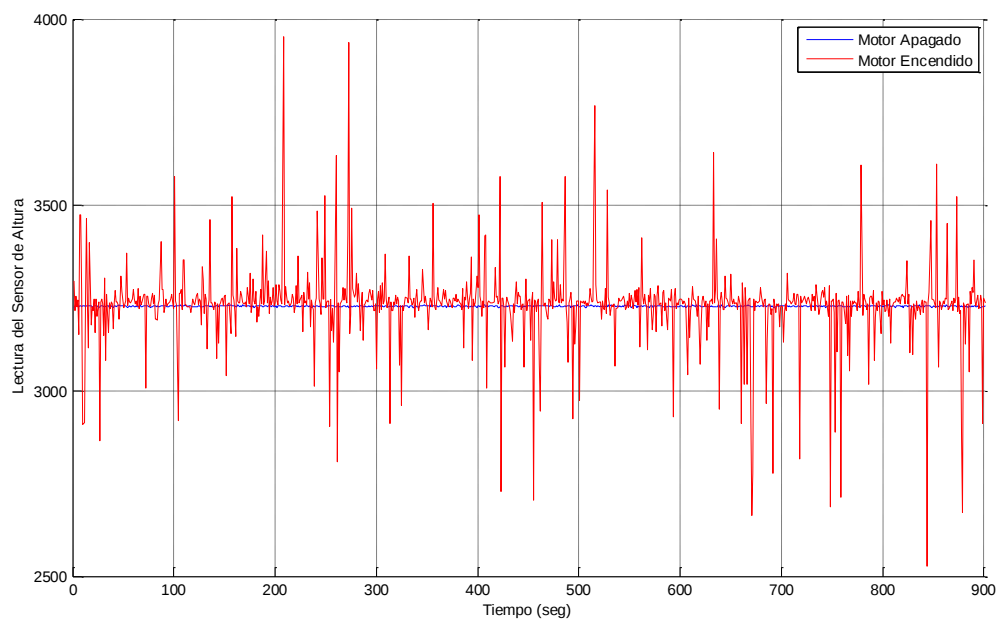


Figura 1. Lectura del sensor de altura

La lectura adimensional del sensor de altura (Figura 1) es convertida en milímetros empleando la siguiente ecuación:

$$Sensor_{mm} = -0.006323676 \cdot Sensor_{lectura} + 26.35122 \quad [1]^1$$

¹ Linealización del sensor realizada por el Ingeniero Felipe Herrera

Aplicando la ecuación [1] a la lectura del sensor de altura se tiene la Figura 2.

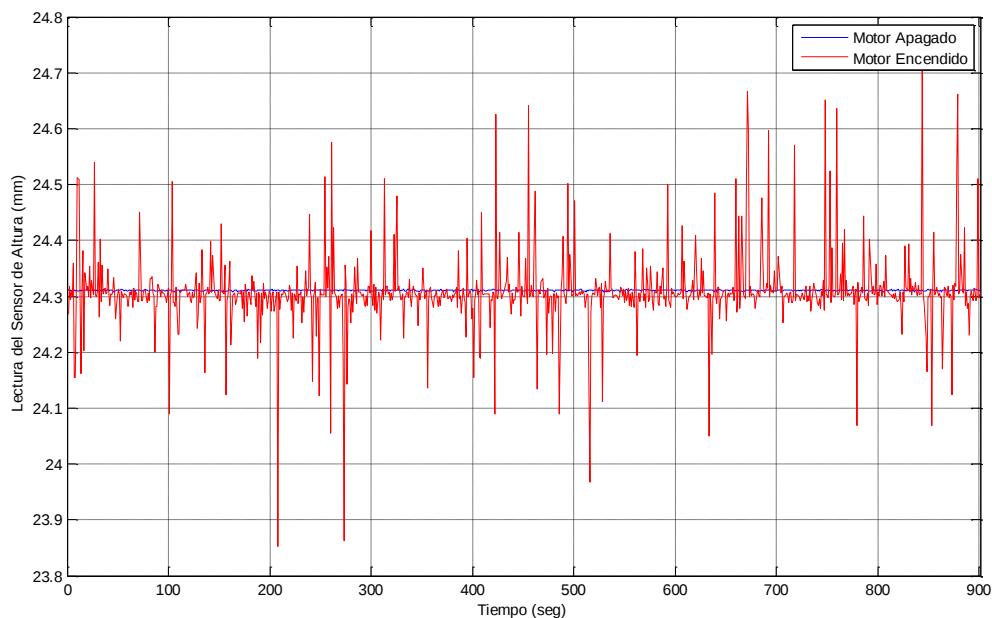


Figura 2. Lectura del sensor de altura en mm

En la Tabla 1 se muestran datos estadísticos del resultado obtenido en el experimento.

	Motor Apagado	Motor Encendido
Media Aritmética (mm)	24,310	24,308
Desviación Estándar (mm)	0,009	0,067
Error máximo (mm)	0,005	0,900

Tabla 1. Datos estadísticos de la lectura del sensor de altura

Los datos obtenidos del experimento muestran que la variación en la medida con el motor encendido varía significativamente. En el caso del error máximo, este error puede ser hasta 100 veces mayor cuando el motor está encendido.

Debido a que el apagado del motor, cada vez que se va a medir la altura de la pieza, no es una solución viable, se deben implementar una alternativa que reduzca el efecto no deseado.

1. FILTRO PASO BAJO DIGITAL IIR

Con el objetivo de reducir las variaciones de la señal del sensor de altura se ha implementado un filtro paso bajo digital IIR (Infinite Impulse Response). Este tipo de filtro, a pesar de incluir una operación aritmética de multiplicación en cada iteración, consume pocos recursos de memoria al almacenar únicamente el resultado de la muestra anterior.

La ecuación de diferencias del filtro IIR se muestra a continuación:

$$y[n] = y[n - 1] + \alpha \cdot (x[n] - y[n - 1]) \quad [2]$$

Donde $y[n]$ es la señal filtrada y $x[n]$ es la señal leída del sensor de altura.

Si $\alpha = 1$, $y[n] = x[n]$ y el efecto del filtro sería nulo.

A medida que α se aproxime a 0, el efecto del filtro será mayor reduciendo el ruido de la señal pero aumentando el tiempo de respuesta. Para analizar la respuesta frecuencial del filtro se convertirá la ecuación de diferencias [2] en Transformada Z:

$$Y[z] = Y[z] \cdot Z^{-1} + \alpha \cdot X[z] - \alpha \cdot Y[z] \cdot Z^{-1}$$

$$Y[z] \cdot (1 - Z^{-1} + \alpha \cdot Z^{-1}) = \alpha \cdot X[z]$$

$$\frac{Y[z]}{X[z]} = \frac{\alpha}{1 - (1 - \alpha) \cdot Z^{-1}}$$

$$\frac{Y[z]}{X[z]} = \frac{\alpha \cdot Z}{Z - (1 - \alpha)} \quad [3]$$

En MatLab se ejecuta el siguiente código. La función *bode* permite analizar la respuesta en frecuencia de la función de transferencia [3] para evaluar distintos valores de α .

```
%Respuesta en frecuencia del filtro IIR paso bajo implementado
Z=tf('z',1);

alpha=1;
H1=alpha*Z/(Z-(1-alpha));
alpha=0.01;
H2=alpha*Z/(Z-(1-alpha));
alpha=0.005;
H3=alpha*Z/(Z-(1-alpha));
alpha=0.0033;
H4=alpha*Z/(Z-(1-alpha));

close all
bode(H1,'c')
hold on
bode(H2,'r')
bode(H3,'b')
bode(H4,'m')

legend('\alpha = 1','\alpha = 0.01','\alpha = 0.005','\alpha = 0.0033')
```

grid on

La respuesta obtenida se muestra en la Figura 3. Para $\alpha = 1$, el filtro no altera la señal de entrada. A medida que α se aproxima a 0, la frecuencia de corte del filtro disminuye, es decir, se atenúan las altas frecuencias y como consecuencia se reduce el ruido de la señal.

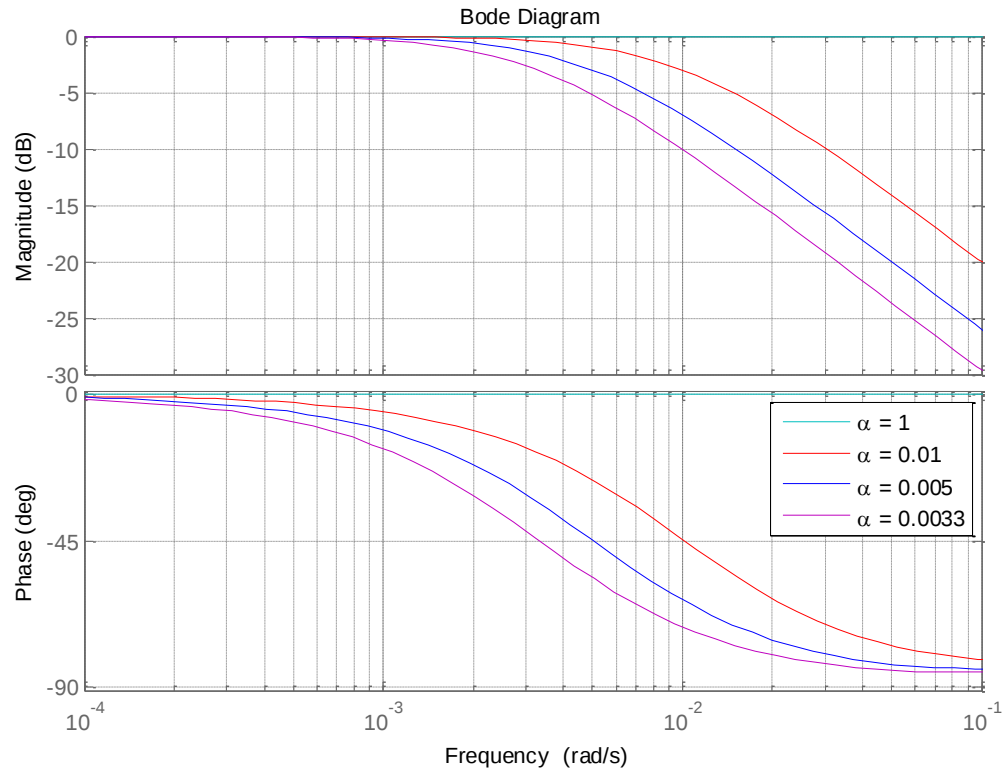


Figura 3. Respuesta en frecuencia del filtro IIR para diferentes valores de α

2. IMPLEMENTACIÒN DEL FILTRO IIR

El filtro IIR se implementa en el proyecto CALLE_SELECCION_V2_5 creado en STEP7-Micro/WIN.
El código de muestra a continuación:

```
Bloque_de_programa → Network 13
LD      PNC:I2.3
MOVW    VW740, AC1
MOVW    AIW0, AC0
-I       AC1, AC0
MOVW    AC0, VW702

MOVW    VW702, VW712
DIV      +100, VD710

+I       VW712, SENSOR_ALTURA:VW720
MOVW    SENSOR_ALTURA:VW720, VW740
```

El esquema de la Figura 4 muestra las variables empleadas para la implementación del filtro.

$$y[n] = y[n-1] + \alpha \cdot (x[n] - y[n-1])$$

The diagram illustrates the variable mapping for the IIR filter equation. Brackets connect the terms in the equation to their corresponding memory addresses:

- $y[n]$ is mapped to **VW720** (green).
- $y[n-1]$ is mapped to **VW740** (red).
- α is mapped to **VW712** (yellow).
- $x[n]$ is mapped to **AIW0** (blue).
- $y[n-1]$ is mapped to **VW740** (red).
- A bracket groups **AIW0** and **VW740**, pointing to **VW702** (yellow).

Figura 4. Esquema variables empleadas en la implementación del filtro IIR

3. EXPERIMENTOS CON EL FILTRO IMPLEMENTADO PARA DETERMINAR VALOR DE α

Para comprobar la funcionalidad del filtro se han realizado experimentos de 15 minutos con intervalos de muestreo de 1 segundo (900 muestras) para diferentes valores de α . En la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** muestran los resultados de la lectura del sensor en milímetros.

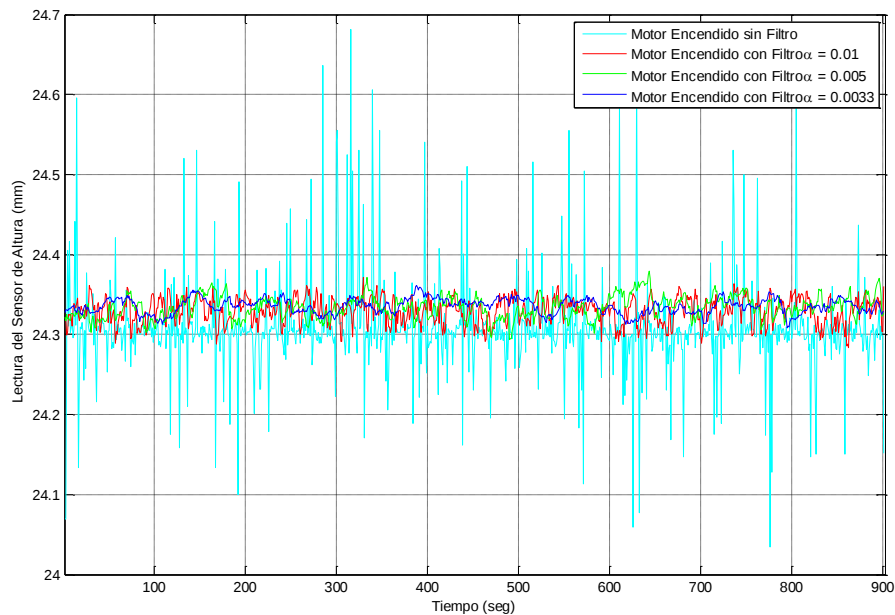


Figura 5. Lectura del sensor de altura en milímetros con filtro de reducción de altura

En la Tabla 2 se muestran datos estadísticos del resultado obtenido en el experimento con el filtro de reducción de ruido implementado.

	$\alpha = 1$ (sin filtro)	$\alpha = 0.01$	$\alpha = 0.005$	$\alpha = 0.0033$
Media Aritmética (mm)	24.307	24.329	24.334	24.335
Desviación Estándar (mm)	0.0596	0.0160	0.0138	0.0092
Error máximo (mm)	0.647	0.0879	0.0853	0.0537

Tabla 2. Datos estadísticos de la lectura del sensor de altura con el filtro de reducción de ruido implementado

4. ANÁLISIS DE RETARDO EN LA RESPUESTA

Para el análisis del retardo en la respuesta del filtro se implementa el modelo simulink mostrado en la Figura 6.

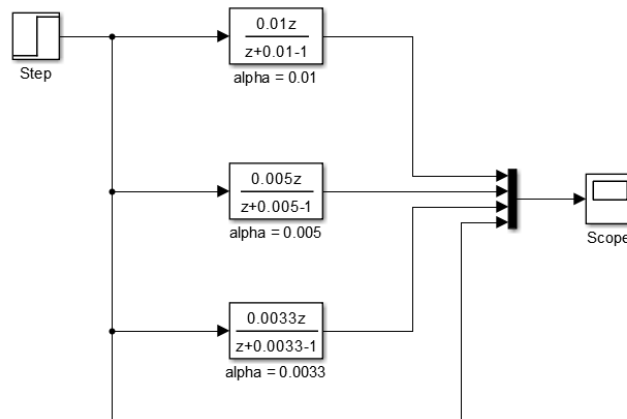


Figura 6. Modelo Simulink para análisis de retardo

La respuesta del filtro a una entrada escalón para diferentes valores de α se muestra en la Figura 7.

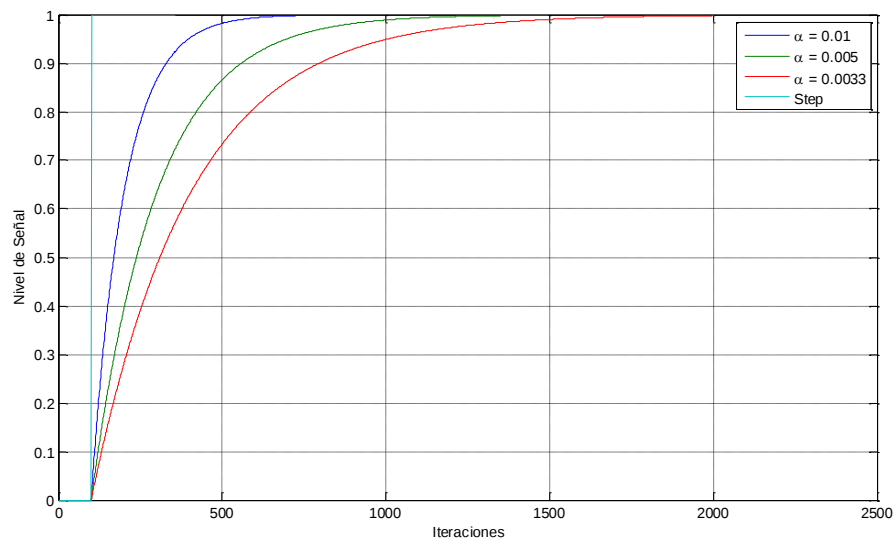


Figura 7. Respuesta escalón del filtro IIR para diferentes valores de α

A medida que el valor de α se aproxima a 0, la respuesta del filtro se hace más lenta. En la Tabla 3 se muestra el número de iteraciones necesarias para alcanzar 95% del valor final ante una entrada escalón unitario.

	$\alpha = 0.01$	$\alpha = 0.005$	$\alpha = 0.0033$
Iteraciones (95%)	398	698	1006

Tabla 3. Iteraciones para alcanzar el valor en estado estable

5. CONCLUSIÓN

El coeficiente del filtro seleccionado debe asegurar un compromiso entre la velocidad de respuesta y la reducción del ruido en la lectura de la señal.

El coeficiente $\alpha = 0.0033$ es descartado porque su respuesta es lenta.

No hay diferencia significativa entre los errores en las medidas para valores de α restantes (ver Tabla 2). Por lo tanto, se elige el valor de α con respuesta más rápida: $\alpha = 0.01$.

6. PRUEBA DE EXACTITUD

Para la prueba de exactitud se han empleado 82 piezas con altura entre 12,39mm y 18,54mm. Las piezas se han medido con un calibrador electrónico y se han comparado con las lecturas del sensor de altura. El valor del coeficiente del filtro de reducción de ruido es $\alpha = 0.01$. En la Tabla 4 se muestran los resultados obtenidos.

Medida Calibrador Digital	Medida Sensor de Altura	Error	Medida Calibrador Digital	Medida Sensor de Altura	Error
12,39	12,4	0,01	15,04	14,8	0,24
12,4	12,4	0	15,22	15,1	0,12
13,17	13,1	0,07	15,31	15,3	0,01
13,39	13,1	0,29	15,31	15,2	0,11
13,7	13,9	0,2	15,6	15,6	0
13,8	13,6	0,2	15,74	15,7	0,04
13,82	13,6	0,22	15,8	15,8	0
13,89	13,8	0,09	15,84	15,9	0,06
13,9	13,8	0,1	15,85	15,9	0,05
13,9	13,8	0,1	15,85	15,8	0,05
13,92	13,7	0,22	15,94	16	0,06
13,97	13,8	0,17	15,94	16	0,06
13,97	13,8	0,17	15,96	16,1	0,14
14	13,9	0,1	15,97	16,1	0,13
14,02	13,9	0,12	15,98	16,3	0,32
14,05	13,9	0,15	16	16,1	0,1

14,06	14	0,06	16	16	0
14,08	13,9	0,18	16,02	16	0,02
14,11	13,9	0,21	16,02	16,1	0,08
14,14	14,1	0,04	16,06	16,3	0,24
14,14	13,8	0,34	16,07	16,2	0,13
14,15	13,9	0,25	16,08	16,2	0,12
14,16	13,9	0,26	16,08	16,4	0,32
14,17	13,9	0,27	16,1	16,2	0,1
14,18	14,2	0,02	16,1	16,2	0,1
14,19	14	0,19	16,1	16,2	0,1
14,2	14	0,2	16,1	16,3	0,2
14,2	14,1	0,1	16,1	16,4	0,3
14,2	14,2	0	16,14	16,3	0,16
14,2	13,9	0,3	16,14	16,3	0,16
14,27	14,1	0,17	16,16	16,1	0,06
14,27	14	0,27	16,18	16,2	0,02
14,28	14	0,28	16,18	16,3	0,12
14,3	14,1	0,2	16,18	16,4	0,22
14,35	14,2	0,15	16,19	16,3	0,11
14,36	14,2	0,16	16,2	16,3	0,1
14,39	14,1	0,29	16,23	16,4	0,17
14,41	14,2	0,21	18,05	18,2	0,15
14,42	14,3	0,12	18,26	18,3	0,04
14,98	14,9	0,08	18,5	18,7	0,2
15	14,9	0,1	18,54	18,5	0,04

Tabla 4. Resultados de la prueba de exactitud - Datos

En la Figura 8 se muestra el gráfico de los errores en la medida para cada una de las piezas y la media del error.

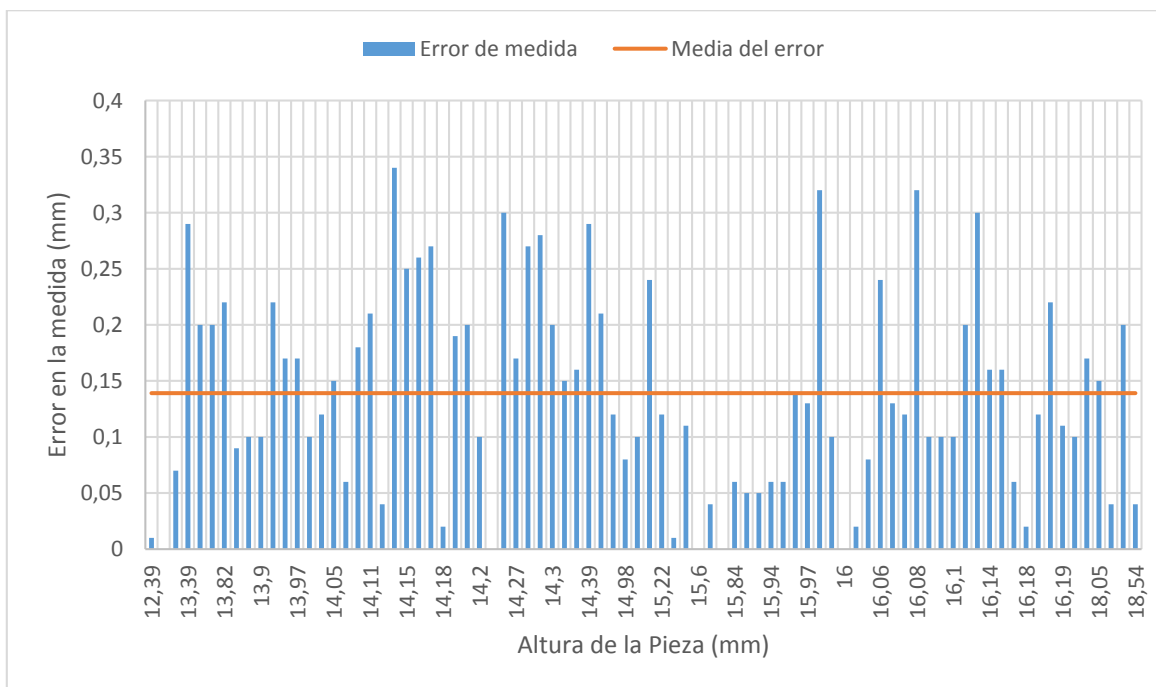


Figura 8. Resultados de la prueba de exactitud - Gráfico

7. PRUEBA DE REPETIBILIDAD

Para la prueba de repetibilidad se han seleccionado 5 piezas que cubren el rango de altura de la calle de selección: entre 12mm y 19mm. Los parámetros empleados son $\alpha = 0.01$ y $TON^2 = 50$. El experimento consiste en realizar diez medidas sobre las 5 piezas seleccionadas. En la Tabla 5 se muestra el resultado de la prueba de repetibilidad.

Pieza	Medida Calibrador	1 Muestra Sensor	2 Muestra Sensor	3 Muestra Sensor	4 Muestra Sensor	5 Muestra Sensor	6 Muestra Sensor	7 Muestra Sensor	8 Muestra Sensor	9 Muestra Sensor	10 Muestra Sensor	Media Medida Sensor	Error Máximo entre Medidas
1	13.18	13	13,1	13,1	13,1	13,1	13	13	13	13	13	13,04	0,1
2	13.87	13,6	13,6	13,6	13,6	13,6	13,6	13,6	13,6	13,6	13,6	13,60	0
3	15.15	15,1	15,2	15,2	15,1	15,1	15,1	15,2	15,1	15,1	15,1	15,13	0,1
4	16.12	16,1	16,2	16,1	16,2	16,1	16,1	16,2	16,2	16,1	16,1	16,14	0,1
5	18.48	18,5	18,5	18,6	18,5	18,6	18,6	18,6	18,5	18,5	18,5	18,53	0,1

Tabla 5. Datos obtenidos de la prueba de repetibilidad

El error máximo obtenido entre las medidas es de 0,1 mm. Se concluye que el valor de α óptimo es 0.01. El tiempo que toma el sensor de altura para alcanzar el valor en estado estable utilizando $\alpha = 0.01$ es aproximadamente 5 segundos.

² TON es el valor del temporizador que activa el cilindro de altura para la medida de la pieza. Un valor de TON más alto es necesario en respuestas más lentas del filtro de reducción de ruido para que la señal alcance el valor en estado estable.