
CAPÍTULO 1

BARÓMETRO

Como instrumento para determinar la altura del cuadricóptero se pensaba utilizar un GPS. La frecuencia de muestreo del GPS y el error en los datos provenientes del mismo lo hacen insuficiente como medio para estimar la elevación del cuadricóptero. Esta fue la motivación para la incorporación de un barómetro.

Las características principales del GPS son:

- Permite obtener un valor para la altura absoluta, libre de bias, pero hace falta promediar muestras durante varios minutos antes de llegar a un dato confiable.
- La precisión del GPS es mala muy cerca del suelo, lo cual representa un problema al intentar despegar y/o aterrizar.

Se opta por incorporar un barómetro, ya que aparentemente dichos sensores padecen de *otros* problemas, y pueden complementar al GPS.

El sensor adquirido es un barómetro digital BOSCH BMP085. Permite medir presión absoluta, y, conociendo la presión y la temperatura a nivel del mar, permite calcular la altura absoluta.

Tiene varios modos de funcionamiento, habiendo un compromiso entre el consumo, la tasa de actualización, y la resolución.

1.1. Objetivos

El objetivo de estas pruebas es determinar como ha de usarse el barómetro BOSCH BMP085, incorporado para asistir en la determinación de la altura del cuadricóptero. Para ello se procede a caracterizar el sensor.

Se analizan las siguientes situaciones:

- Reposo: Se analizan períodos de distinta duración, para cumplir con distintos objetivos:
 - Decenas de minutos: Caracterizar el drift y el tiempo de *warm-up*.
 - Decenas de segundos: Caracterización del ruido de las medidas.
- Altura relativa: 3 experimentos variando el rango a analizar: Puntos que distan decenas de centímetros entre sí, 1m entre sí, y aproximadamente 5m entre sí.

1.2. Materiales

- Laptop.
- Tanza.
- Cinta métrica.
- Cubo de lapacho.
- IMU “Mongoose” de CKDevices (cuenta con un BMP085).

1.3. Consideraciones previas

El sensor de presión devuelve la presión absoluta. Si se conoce la presión y la temperatura a nivel del mar, es posible calcular la elevación. A nivel de la tropósfera, la capa más baja de la atmósfera, se puede calcular la altura a partir de la presión atmosférica mediante la siguiente fórmula[?]:

$$p = p_0 \cdot \left(1 - \frac{L \cdot h}{T_0}\right)^{\frac{g \cdot M}{R \cdot L}} \quad (1.1)$$

Donde:

- p_0 : Presión atmosférica estándar a nivel del mar - 101325 Pa.
- L : Gradiente de temperatura¹ - 0.0065 K/m
- T_0 : Temperatura estándar a nivel del mar - 288.15 K
- g : Constante de gravitación terrestre - 9.80665 m/s²
- M : Masa molar del aire seco - 0.0289644 kg/mol
- R : Constante universal de los gases - 8.31447 J/(mol·K)

1.4. Procedimiento

- **Drift y *warm-up*:** En los datos tomados durante varios minutos, se observa lo que parecería ser un drift en las medidas obtenidas del barómetro. Se toman muestras durante 1 hora, con el barómetro quieto, comenzando con el circuito en frío².
- **Caracterización del ruido:** Es de interés caracterizar el ruido en los datos provenientes del barómetro. Si se trata de un proceso estacionario, y de ruido blanco, entonces, promediando se puede reducir el error. Se analizan datos tomados durante diversos períodos de tiempo: 5 minutos, 2 minutos, 20 segundos y 15 segundos. Sobre estos datos se calcula la autocorrelación de las muestras, y se compara el ruido con los valores dados por la hoja de datos. La hoja de datos especifica ruido RMS típico para los distintos modos de funcionamiento.

¹Tasa de incremento de la temperatura con la altura (es negativa).

²Habiendo estado apagado durante, por lo menos, los 30 minutos previos a la prueba.

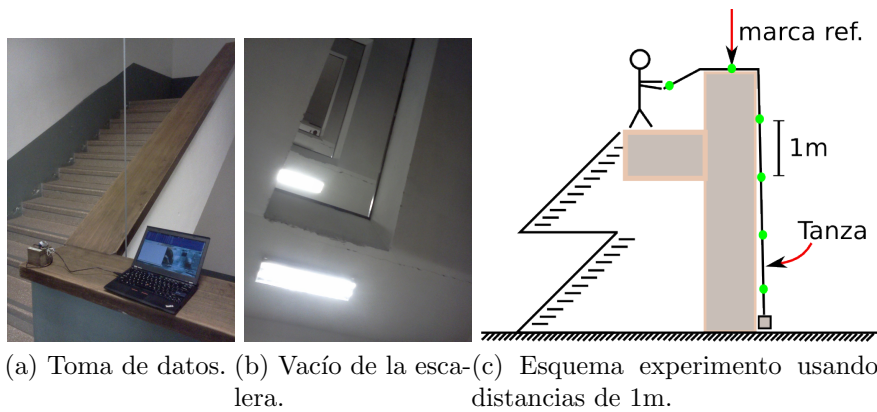


Figura 1.1

- **Medidas de altura absoluta:** Para analizar la performance del barómetro como instrumento para determinar la elevación absoluta, se toman puntos de altura conocida, y se comparan las lecturas contra los datos conocidos.
- **Distancias de varios metros:** Se despliega una cinta métrica en el vacío del centro de una escalera de 4 tramos. La cinta extendida cubre aproximadamente 25 metros. Se comparan las medidas dadas por el barómetro con las que se obtienen de la cinta.

Se utiliza una cinta de agrimensor, graduada cada 10 centímetros, para medir la distancia de un piso a otro. Luego se toman 1 minuto de datos en cada piso, recorriendo la escalera de un extremo a otro. Se repite este experimento 3 veces (se sube, se baja y se vuelve a subir) y luego se realiza un experimento similar, pero recorriendo la escalera de manera casi continua (Pausa por piso menor a 2 segundos).

- **Distancias de un metro:** Se realizan marcas cada un metro, en seis puntos distintos de una tanza. Se ata el cubo de lapacho en un extremo de la tanza, con la *Mongoose* atornillada a él. Se lo deja descender desde la escalera del *IMERL*³. Se suelta tanza hasta que el cubo se apoya contra el piso, de forma que la primer marca en la cuerda se encuentre junto a quien está realizando las medidas. Se hace una pequeña marca sobre la baranda, en el punto que coincide con la primer marca de la cuerda. Se mide la presión durante un minuto. Luego se sube el cubo hasta que la marca en la baranda coincida con la segunda marca de la cuerda ($\Delta h = 1m$), etc. Al comenzar y al terminar se mide la presión a nivel del suelo, para tomar en cuentas cambios meteorológicos.
- **Distancias de decenas de centímetros:** Se ubica el cubo de lapacho siempre en la misma orientación sobre cada uno de los estantes de una estantería, se mide distancia al piso y se toman datos de la presión durante 5 segundos.

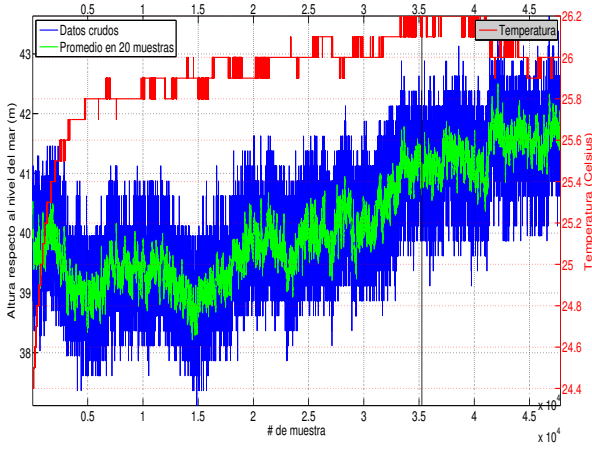
1.5. Análisis y resultados

1.5.1. Drift y *warm-up*

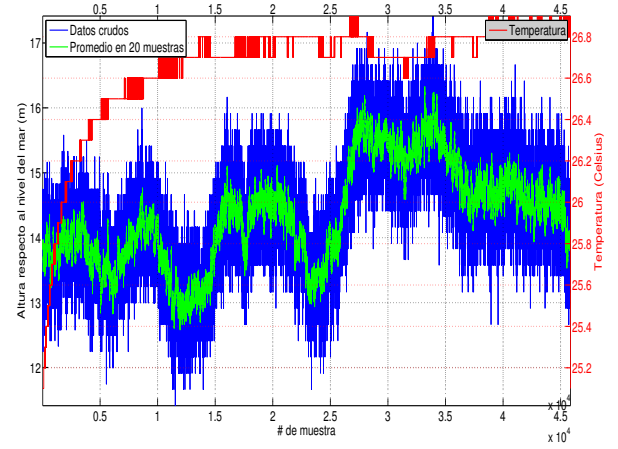
Para observar si hay un drift y/o tiempo de *warm-up* significativo, se procede a tomar muestras durante 1 hora, habiendo estado el dispositivo desenchufado durante por lo menos media hora (el circuito arranca en frío).

³Instituto de Matemática y Estadística Rafael Laguardia

Se repite este experimento varias veces. En las figuras 1.2b y 1.2a se observan los resultados característicos.



(a) Muestras durante una hora, experimento #1.



(b) Muestras durante una hora, experimento #4.

Figura 1.2

Se observa que existe un tiempo de *warm-up* bastante extenso, pero con un rango pequeño. La temperatura tarda entre 15 y 45 minutos en estabilizarse, y en el proceso varía menos de 2°C. Las muestras del barómetro no parecen estar directamente correlacionadas con la temperatura.

El barómetro no parece ser adecuado para medir la elevación absoluta. En los datos de las figuras 1.2a y 1.2b se observan variaciones de hasta 3 metros en la estimación de la altura en un período de 1 hora. Sin embargo, el error en el corto plazo es significativamente menor que en el largo plazo, parece viable el uso del barómetro como estimador de la altura en el corto plazo. Analizaremos este aspecto en secciones posteriores.

1.5.2. Caracterización del ruido

En los logs de la sección 1.5.1, se observa que:

- El comportamiento del ruido en intervalos extensos no es estacionario.
- La mayoría de los saltos en la medida de la altura son de aproximadamente 25cm. Esto no es coherente con las especificaciones dan una resolución de 1Pa, que corresponden a una variación en altura de aproximadamente 8cm.

Estacionareidad

Analizando el ruido en intervalos más pequeños, donde el proceso se puede considerar estacionario, el comportamiento del ruido es muy similar al del ruido blanco.

En la figura 1.6 se observa la autocorrelación de la muestras tomadas con el barómetro en intervalos de tiempo de 5 minutos, 2 minutos, 20 segundos y 15 segundos.

Cabe destacar que el ruido se puede considerar estacionario si se usan intervalos de tiempo menores a 15 segundos.

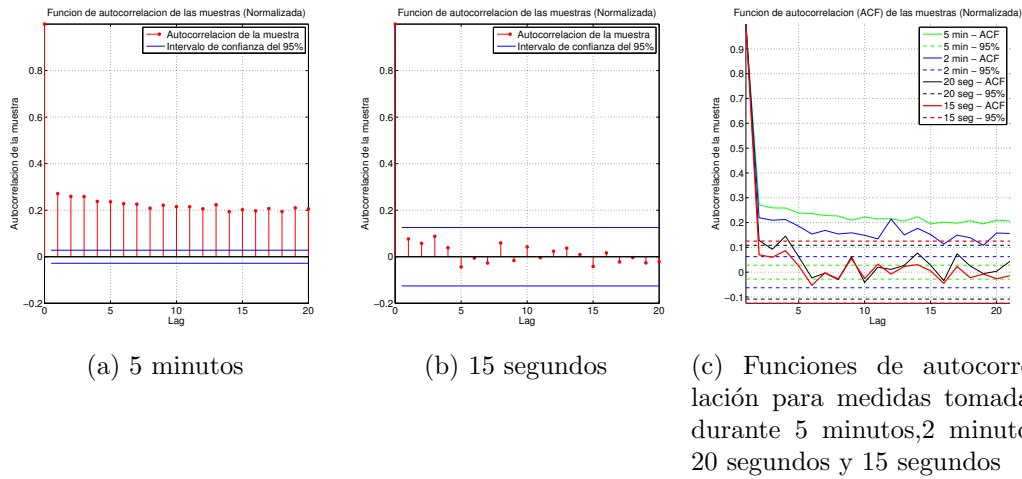


Figura 1.3: Autocorrelación de las muestras del barómetro.

Modos de funcionamiento

El barómetro puede dar más resolución y menos ruido, a cambio de un incremento en el tiempo entre datos nuevos, y en el consumo de energía. Esto lo logra promediando datos internamente. En la tabla 1.3 se compara el ruido RMS en los distintos modos, con lo que se lograría usándolo en el modo básico (sin promediar internamente) y promediando en el microprocesador.

Modo	Ruido RMS (m)		
	μp	Sensor	specs
0	0.52	0.52	0.50
1	0.37	0.45	0.40
2	0.25	0.37	0.30
3	0.63	0.35	0.25

Cuadro 1.1

La resolución más atractiva parece ser la número 2, en la cual se promedian 4 datos.

Resolución del instrumento

En la figura 1.5b se observa un histograma de las diferencias entre muestras sucesivas de los datos del barómetro. Se observa que la mayor parte de los datos presentan saltos de 25cm. Se esperaba una discretización en niveles de aproximadamente 8cm, correspondientes a variaciones de presión de 1Pa (la resolución del instrumento). Aunque es difícil de observar se encuentran muestras en todos los bins.

1.5.3. Altura absoluta

Las figuras 1.2a y 1.2b se corresponden a datos tomados a la misma altura, pero en días distintos. Cabe destacar que la diferencia entre ambas curvas es de aproximadamente 25 metros. Se descarta la posibilidad de utilizar el barómetro para determinar la altura absoluta, ya que estando el barómetro a una altura fija, la elevación varía mucho de un día a otro, lo cual refleja una fuerte dependencia con factores externos, probablemente climáticos, que no interesa considerar.

1.5.4. Distancias de varios metros

En las siguientes figuras se observan los resultados del experimento. Las líneas verticales (en negro) representan el comienzo y el fin de la toma de datos en cada

piso. No se hace una medida de la altura absoluta, se miden las distancias entre piso y piso (con la cinta métrica), y se usa como origen de coordenadas la altura dada por el promedio de algunas muestras al comienzo del experimento, ya sea en el piso de más arriba, o en el piso de más abajo (bajadas y subidas respectivamente). La coordenada Y de los segmentos en rojo representan la distancia entre el origen y el piso actual. Dicha distancia se mide con la cinta métrica.

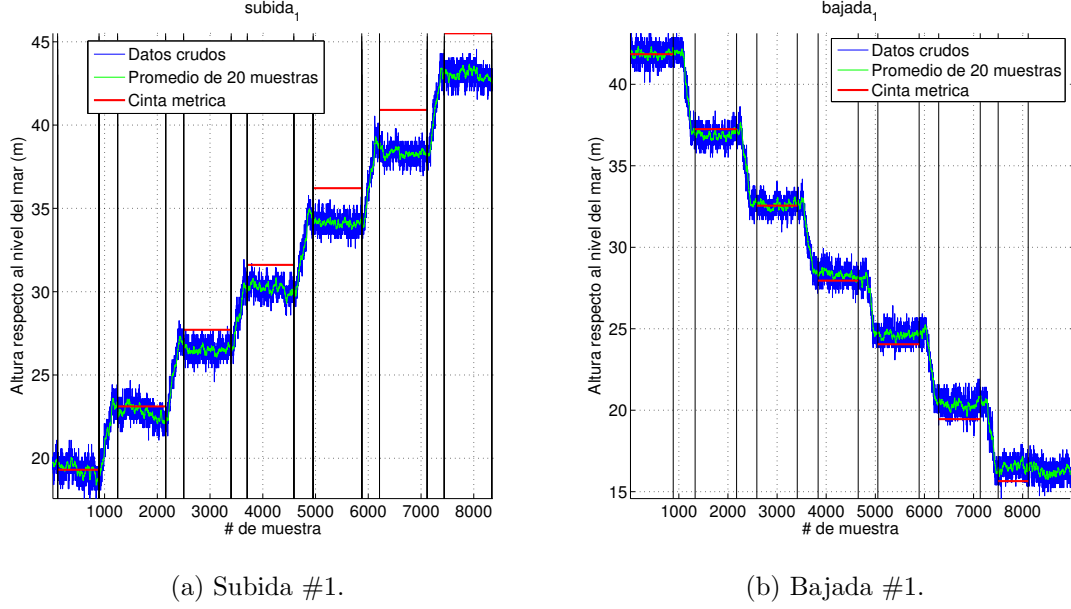


Figura 1.4: Subida/Bajada #1, 2 minutos de datos por piso.

En la figura 1.4a se observa que para cuando se termina de recorrer la escalera, el error acumulado se llega a los 3 metros. En la 1.4b se observan resultados mejores que en la figura 1.4a. Se repite la subida, y se obtienen resultados similares a los de la figura 1.4.

Cabe destacar que la performance durante la bajada rápida (figura 1.5a) es muy similar a la que se obtuvo tomando muestras durante 1 minuto, por lo que

En la figura 1.6a se observa la evolución del error acumulado para dos subidas⁴, una bajada y una bajada rápida.

El error en la determinación de la distancia entre un piso y el siguiente se observa en la figura 1.6b. Dicho error es relativo a la altura de cada piso, que es de aproximadamente 4.3m. Analizando los números con cuidado, se llega a que el error es siempre menor al 10 %.

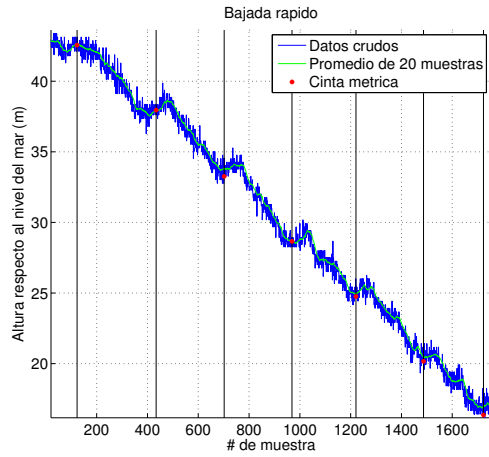
De las figuras 1.5a y 1.6a se desprende que utilizando promedios de 20 muestras⁵, se obtiene un error de aproximadamente 0.5m. El comportamiento del barómetro es aceptable, y se corresponde con las especificaciones de la hoja de datos.

1.5.5. Distancias de un metro

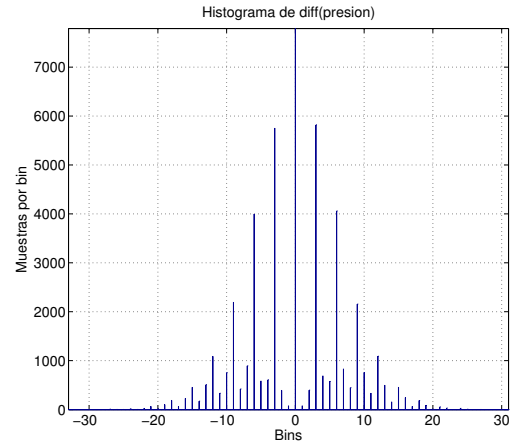
Las figuras 1.7a y 1.7b presentan las medidas obtenidas al realizar las medidas estáticas a alturas que difieren en 1 metro. La figura 1.9 muestra las medidas obteni-

⁴No se incluye una gráfica de la segunda subida, ya que es similar, en cuanto al error, a la de la primera bajada.

⁵Esta es la cantidad de muestras que se promediaron para determinar la altura cada vez en cada piso en el experimento “rápido”.



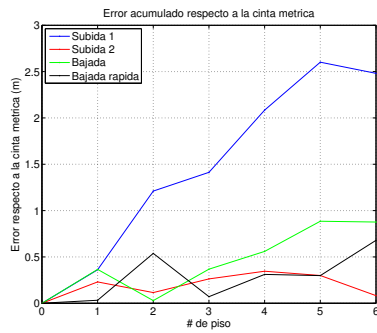
(a) Bajada sin detenerse en cada piso.



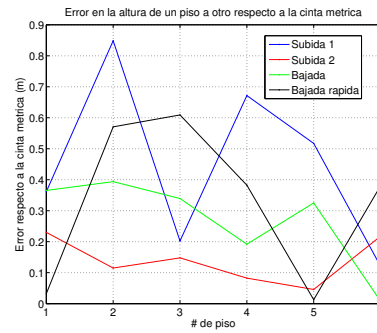
(b) Histograma de las diferencias, experimento #4.

Figura 1.5

das durante el proceso de subir y bajar el barómetro. En las tres figuras se observan los datos obtenidos y la media móvil considerando 20 muestras.

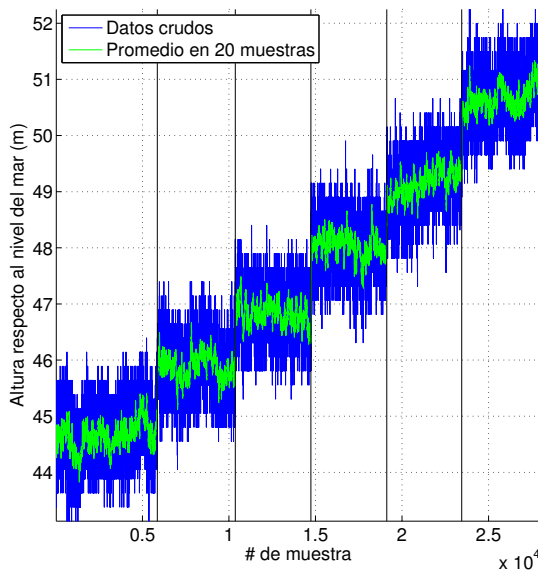


(a) Error acumulado.

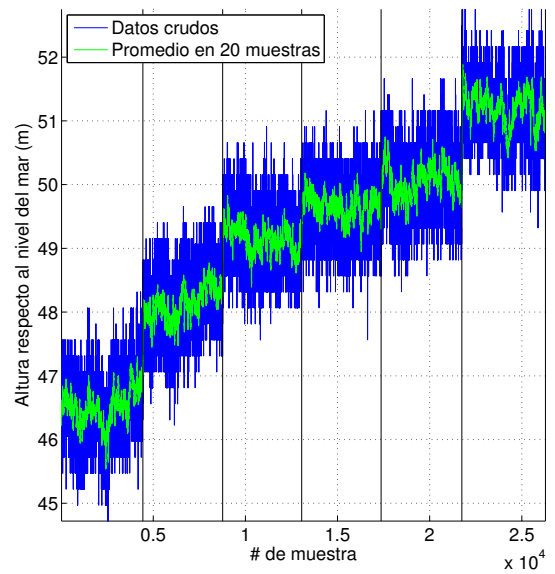


(b) Error en la estimación de la distancia del piso anterior al actual.

Figura 1.6: Evolución del error en distancias de varios metros.



(a) Primer serie de medidas cada 1 metro.



(b) Segunda serie de medidas cada 1 metro.

Figura 1.7: Distancias de 1 metro.

En la tabla 1.2 se muestran los valores de altura obtenidos en las distintas posiciones en las dos series de datos tomadas. La altura absoluta no es correcta, ya que no se usó la presión real a nivel del mar en la ecuación 1.1.

	Altura medida con el barómetro (m)	
Posición	Serie 1	Serie 2
1	44.66	46.52
2	45.87	48.12
3	46.82	49.15
4	48.04	49.66
5	49.15	50.05
6	50.66	51.21

Cuadro 1.2

La altura absoluta registrada por el barómetro cambia considerablemente de una serie a la otra. En la figura 1.7b las medidas están, en promedio, un metro más arriba que en la 1.7a. Los puntos que se consideraron fueron los mismos, sin embargo las medidas fueron realizadas un día de tormenta. La presión atmosférica es muy cambiante en esos días. Eso puede explicar dicha diferencia. Otra explicación puede ser el drift observado en secciones previas.

En la figura 1.8 se muestra la evolución de los errores relativo y acumulado.

Del análisis de cada serie de manera independiente:

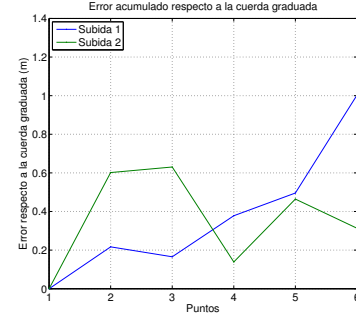
- Serie 1:
 - Error promedio: $0,20m$
 - Desviación estándar: $0,20m$
- Serie 2:
 - Error promedio: $-0,07m$
 - Desviación estándar: $0,49m$

Si se trabaja con las dos series de datos, se obtienen:

- Error promedio: $0,07m$
- Desviación estándar: $0,38m$

Pese a tener pocas muestras, a partir de los datos anteriores se puede suponer que el 95,5% de las veces se tendrán errores inferiores a $0,76m$ en diferencias de un metro. El error se mantiene por debajo de $1m$ al usar pocas (4 muestras, 8, 10, etc) muestras para cada punto. Este error depende del drift del barómetro, y se puede reducir incorporando, de manera periódica, información externa (GPS) sobre la altura absoluta.

En la figura 1.9 se observa la variación en la altura absoluta. Si bien cada tramo comienza y termina a una altura que cae dentro del error esperado, hay tramos del principio y del final del experimento (barómetro apoyado en el suelo) entre los que se observa una diferencia en altura de $1.5m$. Esto no cae dentro del error esperado. El problema se ve luego de transcurridos varios minutos, tiempo mucho mayor al sugerido en la sección 1.5.2. Puede ser causado por el drift y/o por cambios en las condiciones atmosféricas.



(a) Error acumulado.

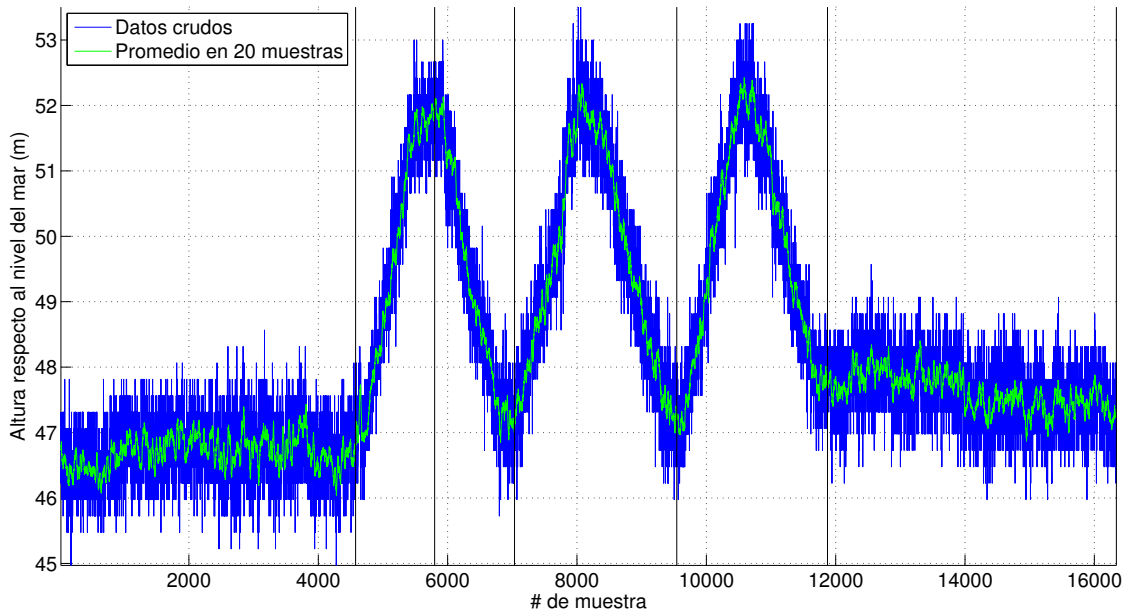
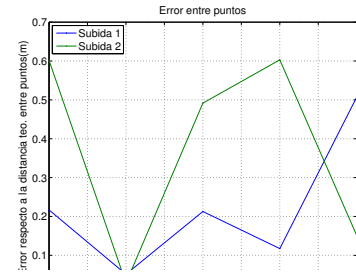


Figura 1.9: Medidas de altura subiendo y bajando.

1.5.6. Distancias de decenas de centímetros

5 segundos por estante

Se toman datos durante 5 segundos en casa escalón. Repitiendo el análisis realizado en secciones anteriores, se obtiene:

- Error promedio: 2.0 cm
- Desviación estándar: 24.4 cm

	μ (cm)	σ (cm)
\searrow	15.1	25.9
\nearrow	4.4	58.9
$\searrow + \nearrow$	10.7	49.0

3m en aproximadamente 7 segundos

Cuadro 1.3

Como prueba extra, se recorre 4 veces la estantería sin detenerse cada estante, completando el trayecto de bajar y volver a subir en aproximadamente 7 segundos. Se calcula la distancia recorrida al bajar, la distancia recorrida al subir, y la total, y se compara dichas distancias contra los valores medidos con la cinta métrica. Los resultados se muestran en la tabla 1.3. Solamente se hicieron 4 experimentos, por lo que los datos estadísticos son solamente para dar una idea de la performance frente a movimientos bruscos.

Cabe destacar que el error se mantiene por debajo de los 1.2m en el peor caso. La figura 1.10 muestra gráficamente los resultados del experimento.

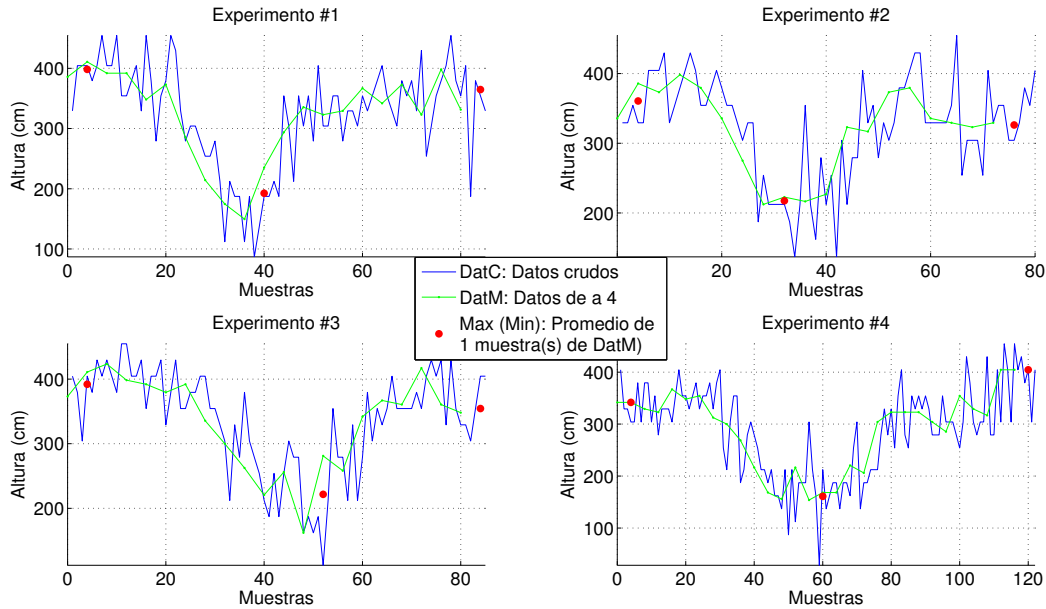


Figura 1.10: 3m metros en aproximadamente 7 segundos.

1.6. Conclusiones

Conclusiones más importante de las pruebas hechas con el barómetro:

- **Tiempo de *warm-up*:** El circuito tiene un tiempo de *warm-up* de aproximadamente 45 minutos, durante el cual la temperatura sube aproximadamente 1.5°C. De las especificaciones de los sensores se deduce que una variación de temperatura tan pequeña no debería afectar la performance. De cualquier forma, es de interés analizar, experimentalmente, el efecto de la variación de la temperatura sobre las lecturas de la IMU.
- **Drift y Altura absoluta:** El drift y la sensibilidad a factores externos (clima, etc) hacen que el barómetro **no** sea adecuado para determinar la altura absoluta. No es posible obtener una mejor estimación de la altura tomando

promedios durante períodos de tiempo mayores, ya que el drift introduciría errores en dicho estimador. Se observa un drift de hasta 0.5m en 1 minuto.

- **Altura relativa:** Estando en reposo, en períodos de tiempo menores a 1 minuto es posible conocer variaciones de altura con un error menor a 0.5m.
- **Rol del barómetro:** Se concluye que el barómetro sirve para determinar variaciones de altura, suavizando la trayectoria, mientras se espera una altura absoluta proveniente del GPS. El barómetro y el GPS se complementan. El barómetro ha de utilizarse con los siguientes parámetros:
 - Error promedio: 0.5m
 - Desviación estándar: 0.25m
 - Modo: 0, promediando 4 muestras en la IMU.
 - Se observa un drift de hasta 0.5m por minuto. Se debe utilizar el GPS para corregirlo.