

**ESCUELA TECNICA SUPERIOR DE
INGENIEROS INDUSTRIALES Y DE TELECOMUNICACIÓN**

UNIVERSIDAD DE CANTABRIA



SOLUCIONES DE EXAMENES
Instrumentación Electrónica de Comunicaciones
(Curso, 2012/2013)



José M^a Drake
CTR (Computadores y Tiempo Real)
Dpto. de Electrónica y Computadores

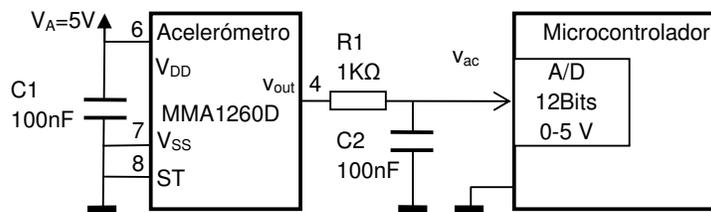
Comentarios:

Los enunciados de los exámenes proponen siempre un caso real de instrumentación que debe analizarse. Las posibles soluciones están abiertas a muchas suposiciones e interpretaciones, y en definitiva decisiones, que deben ser tomadas durante el análisis. La lógica de estas suposiciones de acuerdo con el enunciado del problema, es un aspecto muy relevante de la evaluación del examen. Todo ello lleva a **que la solución de un examen no es única**, y la que aquí se propone es solo una de las posibles que podría realizarse.

Los documentos que se proporcionan son documentos de trabajo para la corrección de los exámenes, y no fueron hechos para ser publicados, por lo **que tienen algunos errores tipográficos en las ecuaciones y en los cálculos numéricos** que llevan a los resultados numéricos. Estúdialos con espíritu crítico.

Se desarrolla un sistema para la medida de la energía por metro de frente de ola en alta mar para oleaje superior a mar gruesa. El sistema se basa en una boya libre dotada de un acelerómetro orientado verticalmente y un microcontrolador que muestrea periódicamente y procesa la salida del acelerómetro para calcular la energía del frente de ola, en base a determinar el periodo entre olas T y las aceleraciones máxima y mínima vertical que produce en la boya cada ola.

La aceleración se mide mediante un dispositivo Motorola MMA 1260D (cuya hojas de características se adjuntan) que esta alimentado con una tensión nominal de 5V. El conversor A/D del microcontrolador tiene una resolución de 12 bits y un rango de 0 a 5V. La frecuencia de muestreo que utiliza el microcontrolador es de 10 muestras/s.

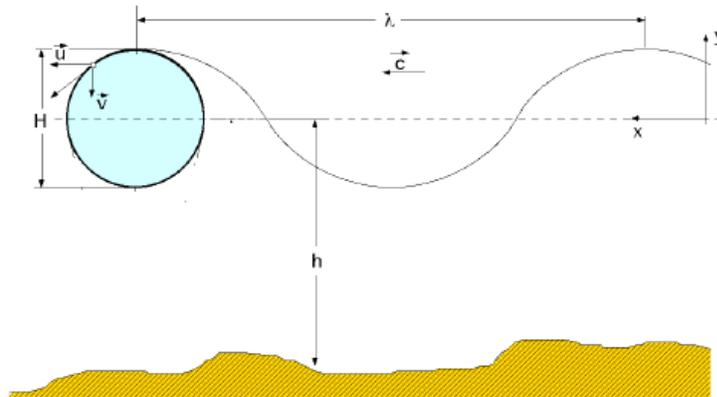


Como se muestra en la figura, en aguas profundas ($h \gg \lambda$) la forma espacial y temporal de la ola es aproximadamente sinusoidal:

$$y = \frac{H}{2} \sin\left(\frac{2\pi}{\lambda}x - \frac{2\pi}{T}t\right)$$

Siendo H la amplitud, T el periodo y λ la longitud de onda de la ola.

La aceleración vertical de la boya (que no se mueve horizontalmente $x = \text{cte.}$) es



$$a_y = \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = -\frac{H}{2} \left[\frac{2\pi}{T}\right]^2 \Rightarrow |a_{yMax}| = \frac{2H\pi^2}{T^2} (m/s^2) \Rightarrow H = \frac{|a_{yMax}| T^2}{2\pi^2} (m)$$

En base a la hidrodinámica de la ola, se puede relacionar la longitud de onda λ y el periodo T de la ola,

$$\lambda = \frac{gT^2}{2\pi} (m)$$

La energía total (cinética + potencial) por unidad de frente de ola E_L se puede expresar en función de las magnitudes previas como

$$E_L = \frac{\rho g^2 T^2 H^2}{32\pi} \approx 979.2 T^2 H^2 = 2.513 T^6 |a_{yMax}|^2 (Wattios \text{ seg} / m)$$

Siendo g la aceleración de la gravedad (9.8 m/s^2) y ρ la densidad del agua (1025 Kg/m^3).

En la siguiente tabla se muestra el pseudocódigo del programa que ejecuta el microcontrolador para calcular la energía por metro de frente de ola.

```

<constant>int T_MUES_MS=100; // Periodo de muestreo del A/D
<constant>float S_AC=1.2; // Sensibilidad del acelerómetro V/g
<constant>float VO_MEDIO=2.5; // Salida del acelerómetro para aceleración nula
<constant>float G=9.8; // Aceleración de la gravedad (m/s^2)
<constant>float KE=2.513; // Constante de la energía de la ola por metro de frente
int n=0; // Cuenta de muestras entre dos máximos consecutivos
float t, acMax, vo, prevVo, voMax, voMin; // Variables intermedias de calculo
funcion leeAD(): float{...} // Retorna la tensión en el AD en Voltios
funcion EnergiaOla() return float{ // Retorna la energía de la ola por metro de frente (Watios*s/m)
  vo=leeAD();
  do{ // Muestrea hasta encontrar el primer paso por VO_MEDIO con pendiente positiva.
    prevVo=vo;
    delay(T_MUES_MS);
    vo=leeAD();
  } until((prevVo<=VO_MEDIO)&(vo>=VO_MEDIO));
  n=0;
  do{ // Muestrea hasta encontrar el siguiente paso por cero con pendiente positiva
    prevVo=vo;
    delay(T_MUES_MS);
    vo=leeAD();
    n=n+1; // Cuenta el número de muestras entre pasos por cero
    if (vo>voMax) voMax=vo; // Retiene el valor del máximo vo
    if (vo<voMin) voMin=vo; // Retiene el valor del mínimo vo
  } until((prevVo<=VO_MEDIO)&(vo>=VO_MEDIO));
  t=0.001*n*T_MUES_MS; // Evalúa el periodo de la ola en s.
  acMax=(voMax-voMin)*G/S_AC/2; // Evalúa la aceleración máxima en m/s2.
  return KE*t^6*acMax^2; // Evalúa y retorna energía por metro de frente de ola en watio*s/m
}

```

Cuestiones:

Para el caso de medida de la energía de olas con un periodo de 5 s y una amplitud de 6 m. calcular la incertidumbre para un nivel de confianza del 95% y/o el error sistemático en la medida de la energía E_L de la ola que se introduce como consecuencia de los siguientes comportamientos reales:

1. La resolución del conversor A/D es de 12 bits y el periodo T de la ola se calcula en base a contar las muestras entre los máximos de la ola.
2. El ruido aleatorio que introduce el acelerómetro.
3. En la boya se está produciendo un cabeceo de $\pm 15^\circ$ respecto de la vertical.
4. Proponer como modificar el proceso de medida (el programa) para reducir a la mitad los errores sistemáticos y la incertidumbre debidas a cada una de las cuatro fuentes de error estudiados previamente.

(Las cuatro cuestiones tienen el mismo valor)

Low G Micromachined Accelerometer

The MMA series of silicon capacitive, micromachined accelerometers features signal conditioning, a 2-pole low pass filter and temperature compensation. Zero-g offset full scale span and filter cut-off are factory set and require no external devices. A full system self-test capability verifies system functionality.

Features

- Integral Signal Conditioning
- Linear Output
- 2nd Order Bessel Filter
- Calibrated Self-test
- EPROM Parity Check Status
- Transducer Hermetically Sealed at Wafer Level for Superior Reliability
- Robust Design, High Shock Survivability

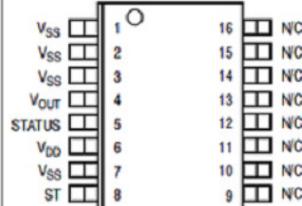
Typical Applications

- Vibration Monitoring and Recording
- Appliance Control
- Mechanical Bearing Monitoring
- Computer Hard Drive Protection
- Computer Mouse and Joysticks
- Virtual Reality Input Devices
- Sports Diagnostic Devices and Systems

MMA1260D

MMA1260D: Z AXIS SENSITIVITY
MICROMACHINED
ACCELEROMETER
 $\pm 1.5g$

Pin Assignment



Pin No.	Pin Name	Description
1 thru 3	V _{SS}	Redundant connections to the internal V _{SS} and may be left unconnected.
4	V _{OUT}	Output voltage of the accelerometer.
5	STATUS	Logic output pin used to indicate fault.
6	V _{DD}	The power supply input.
7	V _{SS}	The power supply ground.
8	ST	Logic input pin used to initiate self-test.
9 thru 13	Trim pins	Used for factory trim. Leave unconnected.
14 thru 16	—	No internal connection. Leave unconnected.

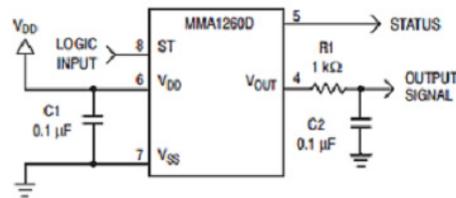


Figure 5. SOIC Accelerometer with Recommended Connection Diagram

MAXIMUM RATINGS (Maximum ratings are the limits to which the device can be exposed without causing permanent damage.)

Rating	Symbol	Value	Unit
Powered Acceleration (all axes)	g_{pd}	1500	g
Unpowered Acceleration (all axes)	g_{upd}	2000	g
Supply Voltage	V _{DD}	-0.3 to +7.0	V
Drop Test ⁽¹⁾	H _{drop}	1.2	m
Storage Temperature Range	T _{stg}	-40 to +125	°C

NOTES:

1. Dropped onto concrete surface from any axis.

OPERATING CHARACTERISTICS

(Unless otherwise noted: $-40^{\circ}\text{C} \leq T_A \leq +105^{\circ}\text{C}$, $4.75 \leq V_{DD} \leq 5.25$, Acceleration = $0g$, Loaded output⁽¹⁾)

Characteristic	Symbol	Min	Typ	Max	Unit
Operating Range ⁽²⁾					
Supply Voltage ⁽³⁾	V_{DD}	4.75	5.00	5.25	V
Supply Current	I_{DD}	1.1	2.2	3.2	mA
Operating Temperature Range	T_A	-40	—	+105	$^{\circ}\text{C}$
Acceleration Range	g_{FS}	—	1.5	—	g
Output Signal					
Zero g ($T_A = 25^{\circ}\text{C}$, $V_{DD} = 5.0\text{ V}$) ⁽⁴⁾	V_{OFF}	2.25	2.5	2.75	V
Zero g ($V_{DD} = 5.0\text{ V}$)	V_{OFF}	2.2	2.5	2.8	V
Sensitivity ($T_A = 25^{\circ}\text{C}$, $V_{DD} = 5.0\text{ V}$) ⁽⁵⁾	S	1140	1200	1260	mV/g
Sensitivity ($V_{DD} = 5.0\text{ V}$)	S	1110	1200	1290	mV/g
Bandwidth Response	f_{-3dB}	40	50	60	Hz
Nonlinearity	NL_{OUT}	-1.0	—	+1.0	% FSO
Noise					
RMS (0.1 Hz – 1.0 kHz)	n_{RMS}	—	5.0	9.0	mVrms
Spectral Density (RMS, 0.1 Hz – 1.0 kHz) ⁽⁶⁾	n_{SD}	—	500	—	$\mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}}$
Self-Test					
Output Response ($V_{DD} = 5.0\text{ V}$)	ΔV_{ST}	0.3	0.6	0.9	V
Input Low	V_{IL}	V_{SS}	—	$0.3 V_{DD}$	V
Input High	V_{IH}	$0.7 V_{DD}$	—	V_{DD}	V
Input Loading ⁽⁷⁾	I_{IN}	-50	-125	-300	μA
Response Time ⁽⁸⁾	t_{ST}	—	10	25	ms
Status ⁽¹²⁾⁽¹³⁾					
Output Low ($I_{load} = 100\ \mu\text{A}$)	V_{OL}	—	—	0.4	V
Output High ($I_{load} = -100\ \mu\text{A}$)	V_{OH}	$V_{DD} - 0.8$	—	—	V
Output Stage Performance					
Electrical Saturation Recovery Time ⁽⁹⁾	t_{DELAY}	—	—	2.0	ms
Full Scale Output Range ($I_{OUT} = -200\ \mu\text{A}$)	V_{FSO}	$V_{SS} + 0.25$	—	$V_{DD} - 0.25$	V
Capacitive Load Drive ⁽¹⁰⁾	C_L	—	—	100	pF
Output Impedance	Z_O	—	50	—	Ω
Mechanical Characteristics					
Transverse Sensitivity ⁽¹¹⁾	$V_{XZ,YZ}$	—	—	5.0	% FSO

NOTES:

- For a loaded output the measurements are observed after an RC filter consisting of a 1 k Ω resistor and a 0.1 μF capacitor to ground.
- These limits define the range of operation for which the part will meet specification.
- Within the supply range of 4.75 and 5.25 volts, the device operates as a fully calibrated linear accelerometer. Beyond these supply limits the device may operate as a linear device but is not guaranteed to be in calibration.
- The device can measure both + and - acceleration. With no input acceleration the output is at midsupply. For positive acceleration the output will increase above $V_{DD}/2$ and for negative acceleration the output will decrease below $V_{DD}/2$.
- Sensitivity limits apply to 0 Hz acceleration.
- At clock frequency \cong 35 kHz.
- The digital input pin has an internal pull-down current source to prevent inadvertent self test initiation due to external board level leakages.
- Time for the output to reach 90% of its final value after a self-test is initiated.
- Time for amplifiers to recover after an acceleration signal causing them to saturate.
- Preserves phase margin (60 $^{\circ}$) to guarantee output amplifier stability.
- A measure of the device's ability to reject an acceleration applied 90 $^{\circ}$ from the true axis of sensitivity.
- The Status pin output is not valid following power-up until at least one rising edge has been applied to the self-test pin. The Status pin is high whenever the self-test input is high.
- The Status pin output latches high if the EPROM parity changes to odd. The Status pin can be reset by a rising edge on self-test, unless a fault condition continues to exist.

PRINCIPLE OF OPERATION

The Motorola accelerometer is a surface-micromachined integrated-circuit accelerometer.

The device consists of a surface micromachined capacitive sensing cell (g-cell) and a CMOS signal conditioning ASIC contained in a single integrated circuit package. The sensing element is sealed hermetically at the wafer level using a bulk micromachined "cap" wafer.

The g-cell is a mechanical structure formed from semiconductor materials (polysilicon) using semiconductor processes (masking and etching). It can be modeled as two stationary plates with a moveable plate in-between. The center plate can be deflected from its rest position by subjecting the system to an acceleration (Figure 2).

When the center plate deflects, the distance from it to one fixed plate will increase by the same amount that the distance to the other plate decreases. The change in distance is a measure of acceleration.

The g-cell plates form two back-to-back capacitors (Figure 3). As the center plate moves with acceleration, the distance between the plates changes and each capacitor's value will change, ($C = Ae/D$). Where A is the area of the plate, ϵ is the dielectric constant, and D is the distance between the plates.

Self-Test

The sensor provides a self-test feature that allows the verification of the mechanical and electrical integrity of the accelerometer at any time before or after installation.

Status

Motorola accelerometers include fault detection circuitry and a fault latch. The Status pin is an output from the fault latch, OR'd with self-test, and is set high whenever the following event occurs:

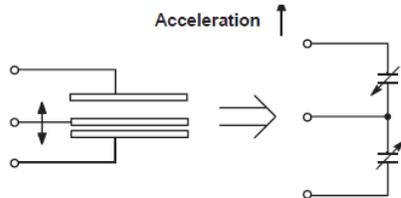


Figure 2. Transducer Physical Model

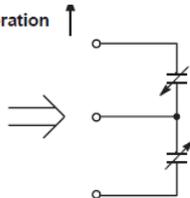


Figure 3. Equivalent Circuit Model

Principio de operación

Una ola tiene una ecuación de onda

$$y(x, t) = \frac{H}{2} \text{sen} \left(\frac{2\pi}{\lambda} x - \frac{2\pi}{T} t \right)$$

La boya tiene una posición fija ($x=x_0$), su desplazamiento vertical es

$$y(t) = \frac{H}{2} \text{sen} \left(\frac{2\pi}{\lambda} x_0 - \frac{2\pi}{T} t \right)$$

La aceleración a la que está sometida es

$$a(t) = \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = -\frac{H}{2} \left(\frac{2\pi}{T} \right)^2 \text{sen} \left(\frac{2\pi}{\lambda} x_0 - \frac{2\pi}{T} t \right)$$

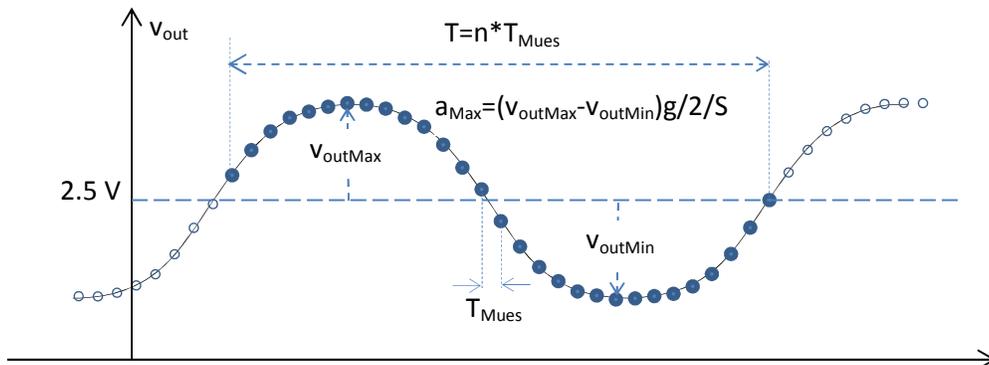
Los valores extremos de la aceleración son

$$a_{Max} = \frac{H}{2} \left(\frac{2\pi}{T} \right)^2 \quad a_{Min} = -\frac{H}{2} \left(\frac{2\pi}{T} \right)^2$$

De acuerdo con la sensibilidad del acelerómetro, la señal v_{out} es

$$v_{out}(t) = \frac{S}{g} a(t)$$

El programa muestrea la señal con un periodo de muestreo de 100 ms



La aceleración vertical máxima de la boya a_{Max} se calcula en base a los valores extremos de v_{out} y de la sensibilidad S del acelerómetro ($g=9.8$ es la aceleración de la gravedad),

$$a_{Max} = \left(\frac{v_{outMax} - v_{outMin}}{2} \right) \frac{g}{S}$$

El periodo T de la ola se calcula en base a contar las muestras (n) entre dos pasos por el valor correspondiente a aceleración nula $v_{out}=2.5$ V, y por el tiempo de muestreo (100ms)

$$T = n * T_{Mues}$$

La energía de la ola por metro de frente se calcula como,

$$E_L = 2.513 T^6 a_{Max}^2$$

Para el caso de referencia de una ola de $H=6\text{m}$ y $T=5\text{s}$, las magnitudes que resultan son:

$$a_{\text{Max}}=4.7374 \text{ m/s}^2 \quad \Delta v_{o\text{Max}}=0.58 \text{ V} \quad N_{\text{Muestras}}=50$$

$$E_L=0.8812 \text{ MW}\times\text{s/m}$$

1º) Efecto de los errores de cuantización

- a) El error de cuantización debido a la resolución de conversor D/A, no introduce error sistemático, pero si introduce incertidumbre en la medida de v_o :

$$\Delta v_{oDA} = 5 \cdot 2^{-(N+1)} = 5 \cdot 2^{-13} = 0,61 \text{ mV} \Rightarrow U_{v_{oDA}} = \frac{\Delta v_{oDA}}{\sqrt{3}} = 0.35 \text{ mV}$$

Este error de cuantización afecta a la medida de E_L en el cálculo de la aceleración máxima, tanto a través de $v_{o\text{Max}}$ como de $v_{o\text{Min}}$:

$$a_{\text{Max}} = \frac{(v_{o\text{Max}} - v_{o\text{Min}})g}{2S}$$

$$U_{a_{\text{MaxDA}}} = \frac{g}{2S} \sqrt{2} U_{v_{oDA}} = \frac{9.8}{1.2} \sqrt{2} \cdot 0.00035 = 0.0020 \text{ m/s}^2$$

- b) Error de cuantización debido a la medida de T: Se debe a que la cuenta del número de muestras es un entero el error es entre 0 y 1 y siempre por debajo del valor exacto. Esto implica la introducción de un error sistemático y un error aleatorio:

Error sistemático: $\Delta T = \Delta N T_{\text{Mues}} = 0.5 * 0.1 = 0.05 \text{ s}$

Desviación típica del error aleatorio: $U_T = U_N T_{\text{Mues}} = \frac{0.5}{\sqrt{3}} T_{\text{Mues}} = 0.029 \text{ s}$

El efecto global sobre la medida de la energía de ola es:

$$\frac{\partial E_L}{\partial T} = 6 \times 2.513 \times T^5 a_{\text{Max}}^2 = \frac{6E_L}{T}$$

$$\frac{\partial E_L}{\partial a_{\text{Max}}} = 2 \times 2.513 \times T^6 a_{\text{Max}} = \frac{2E_L}{a_{\text{Max}}}$$

Para el caso de olas con $T=5 \text{ s}$ y $H=6 \text{ m}$:

$$a_{\text{Max}} = \frac{H}{2} \left(\frac{2\pi}{T} \right)^2 = 4.74 \text{ m/s}^2 \Rightarrow E_L = 2.513 T^6 a_{\text{Max}}^2 = 0.881 \text{ MW} \times \text{s/m}$$

La incertidumbre para el 95% de nivel de confianza en la medida de E_L

$$U_{EL} = \sqrt{\left[\frac{\partial E_L}{\partial T} \right]^2 U_T^2 + \left[\frac{\partial E_L}{\partial a_{\text{Max}}} \right]^2 U_{a_{\text{MaxDA}}}^2} = 0.881 \sqrt{\left[\frac{6}{5} \right]^2 0.029^2 + \left[\frac{2}{4.74} \right]^2 0.002^2}$$

$$= 0.0305 \text{ MW s/m}$$

La incertidumbre es

$$I_{EL} = 2 U_{EL} = 2 * 0.036 = 0.061 \text{ MW} \frac{\text{s}}{\text{m}} \quad (\sim 6.9\%)$$

El error sistemático máximo en la medida de la energía es

$$\Delta E_L = \left| \frac{\partial E_L}{\partial T} \right| * \Delta T = \frac{0.881 \times 6}{5} 0.05 = 0.053 \frac{MWs}{m} \quad (\sim 6.0\%)$$

2º Efectos de los errores aleatorios que introducen el acelerómetro

La anchura de banda para el ruido en la salida del acelerómetro la introduce el circuito RC de acoplo con el conversor A/D,

$$BW = \frac{1}{RC} = \frac{1}{10^3 10^{-7}} = 10^4 \frac{rad}{s} = 1591 \text{ Hz}$$

(Los 50 Hz de la anchura de banda del acelerómetro se refiere a la aceleración que es capaz de medir).

Caben dos opciones:

- Considerar que la BW de 1591Hz es próxima a 1KHz y considerar que el valor $n_{RMS}=5$ mVrms integrado puede tomarse como el ruido en v_o , que en cada medida de la aceleración equivale a

$$a_{onrms} = \frac{n_{RMS} g}{S} = 0.041 \text{ m/s}^2$$

- Considerar la densidad de ruido espectral $n_{SD}=500 \mu g/\sqrt{Hz}$ en la aceleración es mantenible hasta infinito y determinar el ruido integrado en la aceleración como

$$a_{onrms} = n_{SD} \sqrt{NEF} = 500 \cdot 10^{-6} \times 9.8 \times \sqrt{1591 \times 1.57} = 0.245 \text{ m/s}^2$$

Supongo la primera opción porque parece más directa y creíble

$$v_{onrms} = 5.0 \text{ mV}_{rms}$$

Y la desviación típica de los errores en la medida de la aceleración máxima es

$$a_{Maxnrms} = \frac{g}{2S} \sqrt{2} v_{onrms} = \frac{9.8}{2 \times 1.2} \sqrt{2} 0.005 = 0.029 \text{ m/s}^2$$

La desviación típica de la energía de ola E_L debida al ruido generado por el acelerómetro y la correspondiente incertidumbre para el nivel de confianza del 95% son,

$$U_{EL_ruido} = \left| \frac{\partial E_L}{\partial a_{Max}} \right| U_{aMax} = \frac{2E_L}{a_{Max}} U_{aMax} \Rightarrow I_{EL_ruido} = 2 \times U_{EL_ruido}$$

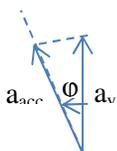
Para el caso de una ola de 5 s y 6 m, estos valores son,

$$U_{EL_ruido} = \frac{2E_L}{a_{Max}} U_{aMax} = \frac{2 \times 0.8812}{4.7374} 0.029 = 0.011 \text{ MW} \times s/m$$

$$\Rightarrow I_{EL_ruido} = 2 \times U_{EL_ruido} = 0.022 \text{ MW} \times \frac{s}{m} \quad (\sim 2.4 \%)$$

3) Efecto del cabeceo de $\pm 15^\circ$

Afecta al sistema de medida en que la aceleración que detecta el acelerómetro es sólo la componente en su orientación a_{ac} de la aceleración vertical de la boya a_y :



$$a_{ac} = a_y \cos(\phi) \Rightarrow \Delta a_{Max} = a_{ac} - a_y = a_{ac} (1 - \cos(\phi))$$

La desviación típica en la aceleración medida por el cabeceo es

$$U_a = \frac{\Delta a}{\sqrt{3}} = \frac{a (1 - \cos(\varphi_{Max}))}{\sqrt{3}} = 0.093 \text{ m/s}^2$$

Como la amplitud de la aceleración se obtiene a partir de la aceleración máxima y de la mínima

$$U_{aMax} = \frac{1}{2} \sqrt{U_{aSup}^2 + U_{aInf}^2} = \frac{U_a}{\sqrt{2}} = 0.066 \text{ m/s}^2$$

La desviación típica de los errores en la medida de la energía de ola es

$$U_{EL \text{ Cabeceo}} = \left| \frac{\partial E_L}{\partial a_{Max}} \right| U_{aMax} = \frac{2E_L}{a_{Max}} U_{aMax} = 0.025 \text{ MW s/m}$$

La incertidumbre para el nivel de confianza del 95% es,

$$I_{EL \text{ cabeceo}} = 2 \times U_{EL \text{ cabeceo}} = 0.050 \text{ MW} \frac{\text{s}}{\text{m}} \quad (\sim 5.7 \%)$$

4º) Modificación del programa para corrección de los errores sistemáticos y de las incertidumbres.

a.- Corrección de las incertidumbres

Las incertidumbres debidas a los errores aleatorios se disminuyen realizando varias medidas y dando como resultado su media.

$$I_{EL \text{ corregida}} = \frac{I_{EL}}{\sqrt{N_m}}$$

Si se desea disminuir la incertidumbre por un factor 2, deben realizarse la medida de 4 olas sucesivas y retornar la media de las cuatro medidas. La corrección del programa se ha introducido en rojo sobre su pseudocódigo.

```

<constant>int T_MUES_MS=100; // Periodo de muestreo del A/D
<constant>float S_AC=1.2; // Sensibilidad del acelerómetro V/g
<constant>float VO_MEDIO=2.5; // Salida del acelerómetro para aceleración nula
<constant>float G=9.8; // Aceleración de la gravedad (m/s^2)
<constant>float KE=2.513; // Constante de la energía de la ola por metro de frente
int n=0; // Cuenta de muestras entre dos máximos consecutivos
float t, acMax, vo, prevVo, voMax, voMin; // Variables intermedias de calculo
float sumEL=0; // Acumula la suma de las medidas de las 4 sucesivas olas
funcion leeAD(): float{...} // Retorna la tensión en el AD en Voltios
funcion EnergiaOla() return float{ // Retorna la energía de la ola por metro de frente (Wattios*s/m)
  vo=leeAD();
  do{ // Muestrea hasta encontrar el primer paso por VO_MEDIO con pendiente positiva.
    prevVo=vo;
    delay(T_MUES_MS);
    vo=leeAD();
  } until((prevVo<=VO_MEDIO)&(vo>=VO_MEDIO));
  for(int i=0;i<4;i=i+1){
    n=0;
    do{ // Muestrea hasta encontrar el siguiente paso por cero con pendiente positiva
      prevVo=vo;
      delay(T_MUES_MS);
      vo=leeAD();
    }
  }
}

```

```

n=n+1; // Cuenta el número de muestras entre pasos por cero
if (vo>voMax) voMax=vo; // Retiene el valor del máximo vo
if (vo<voMin) voMin=vo; // Retiene el valor del mínimo vo
} until((prevVo<=VO_MEDIO)&(vo>=VO_MEDIO));
t=0.001*n*T_MUES_MS+T_MUES/2; // Evalúa el periodo de la ola en s.y corrige error sistemático
acMax=(voMax-voMin)*G/S_AC/2; // Evalúa la aceleración máxima en ms/s.
sumEL=sumEL+ KE*t^6*acMax^2; // Evalúa y acumula la energía por metro de frente de ola en watio*s/m
}
return sumEL/4; // Retoma la media de las 4 medidas
}

```

b.- Corrección del error sistemático

El único error sistemático analizado se ha debido a la medida del periodo de las olas en base a contar el número de muestras entre pasos por cero con pendiente positiva. Ello conlleva que siempre se mide el tiempo por defecto con un error entre 0 y T_mues.

Se compensa introduciendo el valor medio de los errores T_mues/2 en la evaluación del periodo de la ola.

$$t=0.001 * n * T_MUES_MS + 0,001 * T_MUES/2;$$

La corrección se ha introducido en azul en el pseudocódigo del programa.