

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA

Facultad de Ciencias

Escuela Profesional de Ingeniería Física



INFORME DE SUFICIENCIA

PARA OPTAR EL TITULO PROFESIONAL DE

INGENIERO FÍSICO

Desarrollo de un sistema portátil y económico para el monitoreo de vibraciones

Presentado por:

Bach. Salvador Leonidas Mogrovejo Barrera

Asesor:

Mg. Germán Yuri Comina Bellido

LIMA – PERÚ

2011

AGRADECIMIENTOS

Quisiera agradecer a todas aquellas personas que estuvieron involucradas durante mi formación ética, académica y profesional.

A todos los docentes y personal de la facultad por su apoyo y guía, a los docentes que me brindaron sus conocimientos para resolver las dudas que surgían durante el desarrollo de este proyecto, y a los docentes que compartieron sus conocimientos y enseñanzas a través de toda la carrera profesional.

INDICE

AGRADECIMIENTOS	ii
INDICE	iii
NOMENCLATURA	v
LISTA DE FIGURAS	vi
LISTA DE TABLA	vii
TÍTULO	ix
RESUMEN	x
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. Introducción	1
1.2. Planteamiento del problema	4
1.3. Objetivos	4
1.3.1. Objetivo general	4
1.3.2. Objetivos específicos	5
1.4. Justificación	5
2. FUNDAMENTO TEÓRICO	6
2.1 La aceleración	6
2.2 Acelerómetros	13
2.3 Tipos de Acelerómetros	14
2.3.1 Acelerómetros mecánicos	14
2.3.2 Acelerómetros piezoeléctricos	15
2.3.3 Acelerómetros piezoresistivos	16
2.3.4 Acelerómetros capacitivos	16
2.3.5 Acelerómetros térmicos	18
2.3.6 Acelerómetros micro electromecánicos	19
2.4. Aplicaciones	20
2.5. Arduino	22
2.5.1. Arduino Uno	23
2.5.2. Arduino Ethernet Shield (Ethernet Shield)	25

2.6. Acelerómetro ADXL335	27
2.7. Familiarización con el modelo	29
3. PROCEDIMIENTOS EXPERIMENTALES	31
3.1. Selección del Sensor	31
3.2. Sistema Electrónico de Adquisición de Datos (SEAD)	32
3.2.1. Acondicionamiento	33
3.2.2. Adquisición de Datos	34
3.3. Detección de la Actividad Física con el Acelerómetro ADXL335 (Tres ejes)	37
3.3.1. Registro de la actividad física	37
4. RESULTADOS EXPERIMENTALES	39
5. DISCUSIÓN	43
5.1. Análisis cuantitativo de los registros obtenidos	43
6. CONCLUSIONES	47
7. REFERENCIAS	48

NOMENCLATURA

$\mathbf{A} = \mathbf{a} - \mathbf{g}$	Aceleración neta (m/s^2).
\mathbf{a}, a	Vector aceleración (m/s^2) y su módulo.
<i>BIAS</i>	Error sistemático del cero del instrumento por causas de funcionamiento interno y resultante de la sensibilidad a campos externos (m/s^2).
\mathbf{g}, g	Vector aceleración local de la gravedad (m/s^2) y su módulo.
\mathbf{i}, \mathbf{j}	Vectores unitarios del sistema de referencia inercial en el acelerómetro ideal biaxial.
k	Constante elástica del acelerómetro ideal (N/m). Constante elástica del muelle ficticio en la excitación del péndulo elemental (N/m).
l	Longitud natural del muelle del acelerómetro ideal (m). Longitud del péndulo sísmico del acelerómetro pendular ideal (m).
L	Función Lagrangiana ($\text{kg m}^2 \text{s}^{-2}$).
m	Masa sísmica del acelerómetro ideal (kg). Masa excitadora de los péndulos (kg).
\mathbf{r}, r	Vector posición relativa de la masa sísmica y su módulo (m).
\mathbf{v}_r	Vector velocidad relativa a referencia no inercial (m s^{-1}).
\mathbf{x}	Vector posición de la masa sísmica en el acelerómetro ideal (m).
$y(t)$	$y(t)$ Traslación del sistema de referencia del acelerómetro ideal (m).
θ	Oscilación del péndulo sísmico del acelerómetro ideal (rad).
δ	Deflexión del acelerómetro ideal (m), lineal o pendular.
ϵ	Error de alineamiento del acelerómetro ideal biaxial (rad).
λ	Desplazamiento adimensional en \mathbf{i} de la masa sísmica en el acelerómetro ideal.
μ	Desplazamiento adimensional en \mathbf{j} de la masa sísmica en el acelerómetro ideal.
ω	Vector velocidad angular (rad/s).
Ω	Frecuencia propia (rad/s) del acelerómetro ideal.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1.	Aplicación del Acelerómetro en el Análisis de Vibraciones.	1
Figura 2.1.	Ejemplo del acelerómetro lineal con desplazamiento y gravedad alineados con el eje sensible.	7
Figura 2.2.	Ejemplo del acelerómetro biaxial con una pequeña imperfección.	10
Figura 2.3.	Acelerómetro pendular ideal.	12
Figura 2.4.	Acelerómetro mecánico.	14
Figura 2.5.	Esquema básico de un acelerómetro piezoeléctrico	15
Figura 2.6.	Esquema de un acelerómetro piezoresistivo	16
Figura 2.7.	Respuesta a una aceleración	17
Figura 2.8.	Esquema del principio de funcionamiento de un acelerómetro de condensador.	18
Figura 2.9.	Acelerómetro térmico.	19
Figura 2.10.	Arduino Uno R2.	23
Figura 2.11.	Arduino Ethernet Shield.	26
Figura 2.12.	Acelerómetro ADXL335.	27
Figura 2.13.	Diagrama de funcionamiento.	28
Figura 2.14.	Ejes de aceleración.	28
Figura 2.15.	Respuesta vs orientación.	29
Figura 2.16.	Definición de ejes del movimiento.	29
Figura 2.17.	Patrón de aceleración al caminar.	30
Figura 2.18.	Patrón típico de aceleración en los ejes (x, y, z).	30
Figura 3.1.	Sensor ADXL335 montado en un protoboard.	33
Figura 3.2.	Conexión entre el sensor ADXL335 y Arduino.	34
Figura 3.3.	Código de lectura de las señales analógicas.	35
Figura 3.4.	Código de conversión a valores de g.	35
Figura 3.5.	Diagrama de flujo de la programación del SEAD.	36
Figura 3.6.	Diagrama del sistema de detección de actividad física.	37
Figura 3.7.	Posicionamiento del acelerómetro con respecto a la persona.	38
Figura 4.1.	Actividad: Caminando (Persona A).	39

Figura 4.2.	Actividad: Caminando (Persona B).	40
Figura 4.3.	Actividad: Corriendo (Persona A).	40
Figura 4.4.	Actividad: Corriendo (Persona B).	41
Figura 4.5.	Actividad: Saltando (Persona A).	41
Figura 4.6.	Actividad: Saltando (Persona B).	42
Figura 5.1.	Actividad mixta.	46

LISTA DE TABLAS

Tabla 2.1.	Características de diferentes acelerómetros.	21
Tabla 2.2.	Descripción Arduino Uno.	23
Tabla 4.1.	Figuras y actividades realizadas.	39
Tabla 5.1.	Actividad - caminando, media, varianza y desviación estándar.	44
Tabla 5.2.	Actividad - corriendo, media, varianza y desviación estándar.	44
Tabla 5.3.	Actividad - saltando, media, varianza y desviación estándar.	44
Tabla 5.4.	Rangos de la desviación estándar para la detección de la actividad física.	45

TITULO

Desarrollo de un sistema portátil y económico para el monitoreo de vibraciones

RESUMEN

En el presente trabajo se muestra el desarrollo de un sistema electrónico capaz de medir y registrar los patrones de aceleración durante el movimiento de una persona (caminar, correr, saltar).

Las mediciones de aceleración se realizan gracias a un acelerómetro (ADXL335) que es capaz de medir la aceleración con un rango mínimo de escala total de $\pm 3g$. Puede medir aceleración estática de la gravedad en aplicaciones de inclinación, o aceleración dinámica proveniente de movimiento, vibración o golpes. Nos entrega información de aceleración en cada uno de los ejes de medición (x, y, z).

La información generada por el sensor de aceleración debe procesarse y enviarse tanto para la acción de registro en una memoria tipo flash (micro SD)[®], como para su visualización en un LCD (Liquid Crystal Display), por lo tanto es necesario utilizar un microcontrolador que nos permita esa opción. El dispositivo elegido es el sistema denominado Arduino en sus versiones “Arduino Uno” y “Arduino Ethernet Shield” que básicamente es una tarjeta que contiene un microcontrolador Atmega328 de la marca Atmel y cuyas posibilidades son muy amplias y apropiadas para este trabajo, como por ejemplo el envío y representación de datos de manera serial en tiempo real, el control de PWM y la posibilidad de alimentar a otros dispositivos con 3.3 V y 5 V.

El sistema de control fue realizado por medio de código C programado en la interfaz con la que cuenta Arduino en su versión “Arduino 0022”¹. En este programa se toman en cuenta las variables que nos da el acelerómetro, las cuales son procesadas y enviadas a la memoria micro SD para su almacenamiento y posterior visualización en el LCD. Finalmente, se obtuvo un sistema con un algoritmo eficiente que detecta de forma satisfactoria la actividad física, con un 85 % de efectividad a la hora de clasificar la actividad física.

Palabras clave: Aceleración, acelerómetro, ADXL335, Arduino.

¹ El software se puede descargar directamente de la página de Arduino: www.arduino.cc

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Introducción

Debido a los avances en la tecnología, la monitorización ambulatoria con instrumentos de medición de vibración se ha convertido en una herramienta cada vez más importante en el análisis de vibraciones en máquinas y estructuras (ámbito industrial), en el diagnóstico de algunas enfermedades y condiciones médicas (ámbito salud).

En el ámbito industrial (figura 1.1), las máquinas tienen piezas en movimiento que producen fuerzas de inercia que excitan el conjunto. Cuando se analizan dichas vibraciones se puede obtener una gran cantidad de información del estado de la máquina en cuestión, pudiendo llegar a predecir el fallo de algunos componentes con la suficiente antelación para que los servicios de mantenimiento puedan realizar su sustitución antes de que dicho fallo sea catastrófico.



Figura 1.1. Aplicación del Acelerómetro en el Análisis de Vibraciones.

Por otra parte, las máquinas interactúan con las estructuras de soporte haciendo que estas vibren en ocasiones en sus puntos de resonancia, llegando a producirse roturas de soldaduras, pernos, fatiga del material, etc.

Ante estos problemas, el uso de los acelerómetros en este campo, puede ayudar a diagnosticar, corregir o diseñar de forma adecuada las máquinas, estructuras, soportes o elementos aislantes entre ambas para obtener un resultado óptimo.

En el ámbito salud, un instrumento fundamental en los hospitales es el electrocardiograma, cuya función es monitorear la actividad cardíaca del paciente y ver sus signos vitales en tiempo real. Actualmente ofrecen una gran variedad de posibilidades, sin embargo están limitados a que el paciente debe interrumpir su vida normal para que se realice el estudio.

Un Holter o electrocardiograma ambulatorio es un sistema que permite grabar la actividad cardíaca del paciente de manera ininterrumpida por un periodo de tiempo prolongado [1].

Su utilidad clínica reside en su capacidad para evaluar al paciente sin alterar su actividad diaria, lo que permite el examen dinámico del electrocardiograma en su ambiente natural afectado por estímulos físicos [2], los cuáles son registrados por el paciente de forma manual. Una de las funciones diagnósticas más importantes del Holter es determinar si los síntomas del paciente se corresponden verdaderamente con alteraciones en el electrocardiograma.

Las aplicaciones clínicas comunes para el monitor Holter se resumen [3]:

- Evaluación de eventos sintomáticos: mareos, síncope, palpitaciones, fatiga, dolor en el pecho, dificultad para respirar, sudoración episódica.
- Detección de arritmias asintomáticas: fibrilación auricular asintomática.
- Evaluación de la tasa, ritmo o intervalo de cambios en el ECG durante la administración de fármacos.

- Evaluación de situaciones clínicas específicas: infarto de miocardio, cirugía de bypass post coronaria, post implante de marcapasos, bloqueo cardiaco de primer o segundo grado, posible mal funcionamiento del marcapasos.
- Evaluación de cambios en el ECG durante actividades específicas.

Junto con el registro de la actividad cardiaca, el paciente recibe un diario con sus datos donde anota las actividades físicas que realiza y la sintomatología durante el periodo de registro, para su comparación con los hallazgos en los datos recogidos por el Holter [4]. La información que debe ser registrada con exactitud en el diario durante la monitorización incluye [5]:

- Actividades - sentarse, caminar, ejercicio extenuante, comer, actividad sexual, tomar medicamentos, etc.
- Síntomas - dolor de pecho, dolor de espalda, mareos, náuseas, otros dolores.
- Hora del día - Escribir la hora del día para cada actividad o síntoma que se registra en el diario.

A pesar de la diversidad de los sistemas comerciales disponibles, uno de los principales inconvenientes de estos dispositivos es que no cuentan con un sistema de registro de la actividad física y la sintomatología del paciente, que como se ha descrito, se realiza de forma manual. Dada la importancia del registro en forma precisa de las actividades físicas [1], es conveniente implementar un sistema autónomo que registre las actividades físicas y sintomatología del paciente, ampliando así las capacidades de un Holter a fin de complementar la información necesaria en el diagnóstico médico.

Una de las principales contribuciones de este proyecto es la implementación de un módulo para la detección y registro de la actividad física del paciente sin alterar su actividad diaria a fin de que éste pueda ser implementado en un sistema Holter de ECG.

1.2. Planteamiento del problema

La utilidad clínica de un Holter (o electrocardiograma ambulatorio) radica en su capacidad para registrar, durante un periodo de tiempo específico y de forma ininterrumpida, la actividad cardíaca de un paciente sin alterar sus actividades cotidianas. El registro de esta actividad ayuda al médico en el diagnóstico de enfermedades cardíacas que, en principio, son difíciles de detectar por medio de un electrocardiograma normal en ambientes hospitalarios. Para que la información registrada por un Holter tenga éxito en un diagnóstico médico, ésta se complementa con un registro de la actividad física y la sintomatología del paciente. Labor que normalmente realiza el paciente de forma manual a través de un diario proporcionado por el médico. Sin embargo este control manual muchas veces no es llevado a cabo por descuido del paciente, al ser la edad promedio de los pacientes de alrededor de 60 años, es común que se olviden de realizar las anotaciones de sus actividades.

En resumen, el presente proyecto pretende demostrar que es posible aumentar las capacidades de un Holter de ECG, registrando de forma automática la actividad física de un paciente; reemplazando así su registro manual. Esto se pretende lograr mediante la implementación de un módulo para detectar, registrar y clasificar la actividad física del paciente sin alterar su actividad diaria.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo general

Implementar un sistema que permita detectar, registrar y clasificar la actividad física de un paciente mientras este se encuentra en una prueba de monitoreo ambulatorio.

1.3.2. Objetivos específicos

- Diseño de un sistema electrónico basado en un microcontrolador (μC) que almacene datos de una entrada analógica en una memoria tipo flash (SD/MMC) micro-SD.
- Integrar el sistema electrónico a un acelerómetro de tres ejes.
- Detectar la actividad física de una persona mediante el uso del sistema integrado.
- Clasificar las diversas actividades físicas por medio de mediciones estadísticas.

1.4 Justificación

Aumentar las capacidades de un Holter de ECG mediante la detección y registro de la actividad física del paciente, es una innovación con la que los dispositivos actualmente existentes en el mercado no cuentan. Con un registro de la actividad física del paciente, el personal encargado del estudio tiene los datos de la señal cardíaca y la actividad física, los cuales se pueden cotejar para dar un diagnóstico más acertado.

Consideramos que un sistema con tales características contribuirá al mejoramiento de otros dispositivos ambulatorios de monitorización (por ejemplo, dispositivos de registro de presión arterial y glucosa). Es decir, si tales dispositivos añadiesen un registro automático de la actividad física, además de ampliar su funcionalidad, proporcionarían información complementaria y de utilidad en el diagnóstico médico.

2. FUNDAMENTO TEÓRICO

2.1 La aceleración

Esta parte es una introducción a la microacelerometría y sirve de justificación al objetivo propuesto. En primer lugar se exponen los principios de medida de aceleraciones, analizando en particular algunos efectos no lineales y la influencia de los desalineamientos como errores dominantes, con especial énfasis en el efecto de la gravedad durante la calibración. A continuación se describe la microacelerometría por sus aplicaciones fundamentales y los tipos de instrumentos sísmicos más utilizados.

Antes de entrar en materia es preciso aclarar el uso de las unidades de aceleración. Está muy extendido el “g” como unidad de medida de aceleración. Habitualmente se entiende por 1 g la aceleración de referencia del campo de gravedad terrestre a nivel del mar y vale por convenio $g = 9.80665 \text{ ms}^{-2}$ (pp. 29, *The International System of Units (SI)*, ed. Barry N. Taylor, NIST Special Publication 330, 2001). Sin embargo, dependiendo del contexto, g también se puede referir a la aceleración de la gravedad local, que no es necesariamente la de referencia. También se emplea como unidad el Gal, que equivale a 10^{-2} ms^{-2} .

Conviene comenzar por introducir algunos de los principios de la medida de aceleraciones en condiciones de microgravedad, así como el fundamento de los instrumentos sísmicos. Se estudia en este apartado el acelerómetro lineal ideal y se va complicando el modelo con los efectos de rotación, los efectos no lineales, los des-alineamientos y sobre todo la “infiltración” del campo de gravedad local en las medidas.

Estrictamente hablando, por la simple existencia de masa en el Espacio es imposible escapar a la acción de la gravedad. Sin embargo, se entiende comúnmente por *ingravedez* el estado de movimiento de un sistema tal que, según el *Principio de Equivalencia* generalizado por Einstein en la Teoría de la Relatividad General (Landau y Lifschitz, 1989) [6], las fuerzas de inercia equilibran a las gravitatorias, cualquiera que sea la masa. Ocurre así en la caída libre. Aunque parezca paradójico, siguiendo esta definición se deduce que para alcanzar la ingravedez

total es necesario que la única acción externa sobre el sistema sea la gravitatoria. Cualquier perturbación no gravitatoria que altere el movimiento libre podría ser captada por un instrumento transportado a bordo. Así, por ejemplo, un acelerómetro colocado verticalmente sobre una mesa inmóvil mide 1 g, procedente de la fuerza de reacción de la mesa. Cuando las perturbaciones son muy pequeñas comparadas con la propia gravedad se habla de *microgravedad*.

Las ideas anteriores se pueden ilustrar colocando un acelerómetro ideal uniaxial en un sistema de referencia acelerado respecto a uno inercial en un campo de gravedad uniforme (figura 2.1). El acelerómetro ideal se representa mediante un sistema masa muelle lineal. Considérese en principio una aceleración de traslación y la acción de la gravedad colineales con el desplazamiento de la masa sísmica.

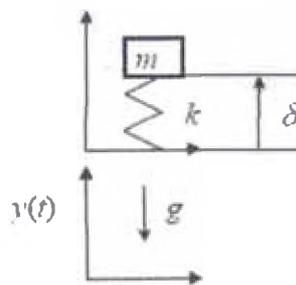


Figura 2.1. Ejemplo del acelerómetro lineal con desplazamiento y gravedad alineados con el eje sensible.

La función de Lagrange para el acelerómetro es:

$$L = \frac{1}{2} m (\dot{\delta} + \dot{y})^2 - \frac{1}{2} k \delta^2 - mg(\delta + y). \quad (2.1)$$

siendo $\delta(t)$ el desplazamiento de la masa sísmica respecto a la carcasa e $y(t)$ la traslación del sistema de referencia ligado al acelerómetro respecto a uno inercial de ejes paralelos. Por aplicación de las ecuaciones de Lagrange al único grado de libertad de la masa sísmica:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\delta}} \right) - \frac{\partial L}{\partial \delta} = 0, \quad (2.2)$$

resulta de la ley de movimiento:

$$\ddot{\delta} + \Omega^2 \delta = -g - \ddot{y}, \quad (2.3)$$

donde $\Omega^2 = k/m$ es la pulsación natural del oscilador, que llamaremos frecuencia circular propia o simplemente frecuencia propia. Generalizando lo anterior a una orientación arbitraria del eje sensible s respecto al sistema de referencia no inercial se tiene la conocida expresión:

$$\ddot{\delta} + \Omega^2 \delta = (\mathbf{g} - \mathbf{a}) \cdot \mathbf{s}, \quad (2.4)$$

que expresa que el término forzante es la proyección de la fuerza específica sobre el eje sensible del sensor. En el caso de caída libre la entrada al sistema es nula ($\mathbf{a}=\mathbf{g}$) y por tanto también lo son la deflexión estacionaria de la masa sísmica y la salida. Para este acelerómetro, el factor de escala entre la fuerza específica de entrada y la deflexión de salida a frecuencias muy inferiores a la propia es precisamente Ω^{-2} y su ancho de banda Ω^2 .

Un acelerómetro ideal triaxial orientado según los ejes del sistema de referencia respondería mediante la ley dinámica:

$$\ddot{\mathbf{x}} + [\Omega^2] \mathbf{x} = \mathbf{g} - \mathbf{a}. \quad (2.5)$$

siendo la matriz de pulsación $\Omega^2 = [m]^{-1}[k]$ con $[m]$ la matriz de masas y $[k]$ la matriz de rigidez, todas diagonales en el caso ideal. Si se tiene en cuenta el efecto de la rotación del sistema de referencia no inercial y considerando la masa sísmica puntual, no es difícil comprobar que dada una velocidad angular ω , una aceleración angular $\dot{\omega}$ y la posición \mathbf{r} y velocidad \mathbf{v}_r relativas de la masa sísmica respecto a la referencia móvil, la ecuación de la respuesta dinámica triaxial sería:

$$\ddot{\mathbf{x}} + [\Omega^2] \mathbf{x} = \mathbf{g} - \mathbf{a} - \boldsymbol{\omega} \times (\boldsymbol{\omega} \times \mathbf{r}) - \dot{\boldsymbol{\omega}} \times \mathbf{r} - 2\boldsymbol{\omega} \times \mathbf{v}_r. \quad (2.6)$$

Ya se aprecia que, incluso en el caso del acelerómetro lineal ideal es necesario plantear hipótesis o conocer las condiciones del movimiento para poder medir una única incógnita vectorial, ya sea la aceleración lineal, la velocidad angular o la gravedad local.

Un instrumento real presenta diferencias con el modelo simplificado anterior. Además de la inercia y la fuerza recuperadora, representada por el muelle en el modelo ideal, aparecen fuerzas parásitas. Entre ellas está la fricción, responsable de la mayor parte del amortiguamiento en la respuesta dinámica. También están presentes las sensibilidades a acciones ambientales, los errores de alineamiento, las no linealidades del sistema y los efectos cruzados entre ejes sensibles, dando lugar a leyes de respuesta más complejas.

Se entiende por sensibilidad del cero (*bias*) cualquier respuesta espúrea del instrumento con señal de entrada nula a una acción externa y que no esté incluida en el ajuste del cero. Es un error sistemático que generalmente procede de una fuente conocida, de manera que, en principio, se puede modelar o por lo menos acotar. No debe confundirse con el error de cero denominado *offset*, que es ajustable electrónicamente o por *software*. Es el caso de la sensibilidad a campos electromagnéticos intensos o las sensibilidades térmicas de los parámetros internos del instrumento, entre otras. Los acelerómetros, en particular, pueden presentar sensibilidad a la gravedad ambiental, no sólo a través del término forzante de la respuesta dinámica, sino también en forma de *bias* y sensibilidad en el factor de escala.

La importancia del *bias* en aplicaciones microacelerométricas radica en que puede enmascarar la información útil en el espectro de bajas frecuencias. Además, su calibración se ve afectada por la gravedad local cuando se emplean técnicas convencionales.

Las no linealidades y los efectos cruzados suelen manifestarse en la matriz de rigidez del sistema. Considérese el siguiente ejemplo para ilustrarlo. Un acelerómetro biaxial (fácilmente generalizable a triaxial) como el de la figura 2.2, con una masa sísmica restringida por dos

muelles lineales de longitud natural l , uno de ellos desalineado un ángulo pequeño ε , la única imperfección considerada.

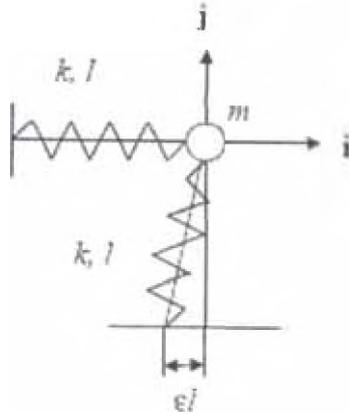


Figura. 2.2. Ejemplo del acelerómetro biaxial con una pequeña imperfección.

La dinámica queda descrita por la función de Lagrange:

$$L = \frac{1}{2} m \dot{\lambda}^2 + \dot{\mu}^2 - \frac{1}{2} k l^2 \left(\sqrt{(\lambda+1)^2 + \mu^2} - 1 \right)^2 - \frac{1}{2} k l^2 \left(\sqrt{(\mu+1)^2 + (\lambda+\varepsilon)^2} - 1 \right)^2. \quad (2.7)$$

donde los grados de libertad son los desplazamientos adimensionales respecto a la posición de equilibrio, λ y μ . Con $\varepsilon = 0$ se puede estudiar el carácter no lineal (hasta orden 2) de la respuesta dinámica a partir de la ecuación:

$$\begin{Bmatrix} \ddot{\lambda} \\ \ddot{\mu} \end{Bmatrix} + \Omega^2 \begin{bmatrix} 1+\mu & \mu \\ \lambda & 1+\lambda \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \lambda \\ \mu \end{Bmatrix} = 0. \quad (2.8)$$

No se ha tenido aquí en cuenta la gravedad ni la aceleración ya que se trata de ver los efectos no lineales en la matriz de rigidez. Se aprecia que la no linealidad afecta tanto a los términos de la diagonal, que son los que determinan los factores de escala de cada eje, como a los de fuera de la diagonal, responsables de la sensibilidad transversal. Además, se pierde la simetría.

Linealizando se recuperaría el sistema dinámico del acelerómetro ideal. En la práctica los términos no lineales se podrían hacer tan pequeños como sea necesario aumentando la rigidez, si bien es conocido que aumentar el ancho de banda, que es precisamente Ω^2 , implica empeorar la resolución del instrumento en lazo abierto (Merhav, 1996) [7].

Usando ahora el parámetro $\varepsilon \neq 0$ y después de linealizar con la condición $\lambda, \mu \ll \varepsilon \ll 1$, lo cual es una situación típica sobre todo en servoacelerómetros, resultaría el sistema dinámico:

$$\begin{Bmatrix} \lambda \\ \mu \end{Bmatrix} + \Omega^2 \begin{bmatrix} 1 & \varepsilon \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \lambda \\ \mu \end{Bmatrix} = 0. \quad (2.9)$$

Se observa el efecto del desalineamiento: aún habiendo linealizado la dinámica aparece la sensibilidad cruzada y se pierde la simetría. Este sencillo ejemplo explica mediante un desalineamiento la sensibilidad transversal, que es independiente de los términos no lineales. Otros efectos asociados con no linealidades, como la rectificación de vibraciones, están descritos en la literatura especializada (McLaren, 1975 [8]; Merhav, 1996 [7]), si bien, según se ha visto, no son las no linealidades las causantes de la sensibilidad a la gravedad local. Más importantes son los errores de alineamiento en instrumentos de precisión.

Otro modelo de gran interés práctico es el acelerómetro pendular ideal (figura 2.3). Es el tipo de mecanismo empleado por ejemplo en los servoacelerómetros *Quartz-Flexure*, muy extendidos en aplicaciones aeronáuticas. La rigidez a la deflexión angular se representa mediante un muelle de torsión.

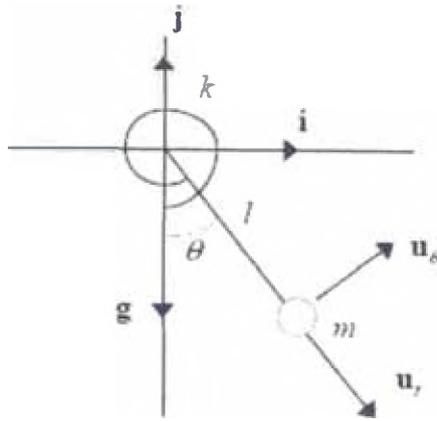


Figura. 2.3. Acelerómetro pendular ideal.

La función de Lagrange, incluyendo gravedad y traslación, es:

$$L = \frac{1}{2}m(l^2\dot{\theta}^2 + \mathbf{v}^2 + 2l\dot{\theta}\mathbf{v} \cdot \mathbf{u}_\theta) - \frac{1}{2}kl^2\theta^2 + m\mathbf{g} \cdot l\mathbf{u}_r, \quad (2.10)$$

donde \mathbf{v} es la velocidad de traslación del punto de charnela y no se considera rotación de la referencia móvil. Aplicando la ecuación de Lagrange a la variable $\delta = l\theta$ resulta de nuevo (2.4) pero con el eje sensible $\mathbf{s} = \mathbf{u}_\theta$. Linealizando y tomando por eje sensible el \mathbf{i} se tiene la ecuación dinámica:

$$\ddot{\delta} + \left(\frac{\Omega_z - g_z}{l} + \Omega^2 \right) \delta = g_x - a_x. \quad (2.11)$$

Claramente la sensibilidad transversal se manifiesta como una perturbación de la frecuencia propia y por tanto del factor de escala. Este efecto es una de las causas del referido como sensibilidad del factor de escala a la gravedad ambiental en los apartados siguientes. Aquí es donde se ve el posible efecto de la calibración del factor de escala en un ambiente con gravedad 1 g cuando el ambiente de operación va a ser el microgravitatorio. No debe olvidarse, además, que en el rango de las microaceleraciones un error de orientación o un desalineamiento oscilatorio puede producir errores de medida por infiltración de la gravedad local comparables a la propia señal a medir (Norris *et al.*, 1990; Santiago *et al.*, 1996; Santiago *et al.*, 1998).

Por otra parte, el ruido asociado a cada técnica de medida puede ser determinante hasta el punto de definir la resolución del instrumento. El ruido de banda ancha está siempre presente y se infiltra con facilidad en los sistemas de adquisición y registro, mientras que el ruido $1/f$ de baja frecuencia puede impedir la medida de las señales típicas de la microgravedad. Hay otros fenómenos que pueden determinar la resolución de medida, como la histéresis, que dependen principalmente de los métodos de transducción y detección. La casuística es muy amplia, cada diseño electromecánico tiene propiedades distintas, con sus virtudes y defectos. Por tanto, el análisis detallado de las características y la estimación de errores de medida debe realizarse considerando cada aplicación particular.

En definitiva, la respuesta linealizada de un acelerómetro queda determinada mediante cuatro parámetros por cada eje de medida, que son: el factor de escala, el error del cero y los cosenos directores del eje sensible respecto a la carcasa. Todos ellos son sensibles a la temperatura. Para determinarlos por calibración es necesario tener en cuenta la gravedad local y su proyección, tanto en el eje sensible como en los transversales. Los términos no lineales son de segundo orden, normalmente, pero pueden dar lugar a efectos no deseados y difíciles de desacoplar, especialmente en instrumentos triaxiales.

2.2 Acelerómetros

Un acelerómetro es un instrumento que se usa para medir la aceleración de un objeto al que va unido, lo hace midiendo respecto de una masa inercial interna.

Existen varios tipos de tecnologías (piezo-eléctrico, piezo-resistivo, galgas extensométricas, láser, térmico, etc.) y diseños muy distintos unos de otros según la aplicación a la cual van destinados y las condiciones en las que han de trabajar.

La medida de la aceleración es muy utilizada últimamente gracias a las excelentes prestaciones de los sensores desarrollados para ser aplicados en sistemas de seguridad en automoción, robótica, electrónica de consumo entre muchas otras aplicaciones.

Los primeros sensores de aceleración eran unos sistemas muy complejos y no muy fiables que se basaban en la medida de los desplazamientos de una masa inercial sujeta a la aceleración con resortes que contrarrestaban el efecto de la fuerza generada por la masa.

Otras variables que llevan implícita la medida de la aceleración son los sensores de impacto que se caracterizan por la detección de fuertes aceleraciones en cortos períodos de tiempo.

2.3 Tipos de Acelerómetros

2.3.1 Acelerómetros mecánicos (figura 2.4)

Emplean una masa inerte y resortes elásticos. Los cambios se miden con galgas extensiométricas, incluyendo sistemas de amortiguación que evitan la propia oscilación.

Galgas Extensiométricas: Es un dispositivo electrónico que aprovecha el efecto piezorresistivo para medir deformaciones. Ante una variación en la estructura del material de la galga se producirá una variación de su resistencia eléctrica. Los materiales que suelen utilizarse para realizar galgas son aleaciones de Cobre y níquel, platino y silicio.

En este tipo de acelerómetro, una o más galgas extensométricas hacen de puente entre la carcasa del instrumento y la masa inercial, la aceleración produce una deformación de la galga que se traduce en una variación en la corriente detectada por un puente de Whetstone, la deformación es directamente proporcional a la aceleración aplicada al acelerómetro.

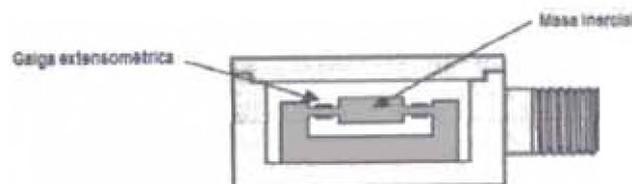


Figura 2.4. Acelerómetro mecánico [10].

2.3.2 Acelerómetros piezoeléctricos (figura 2.5)

Su funcionamiento se basa en el efecto piezoeléctrico. La palabra piezo de origen griego significa “apretar”, por lo que se puede deducir su comportamiento: una deformación física del material causa un cambio en la estructura cristalina y así cambian las características eléctricas. Su principal inconveniente radica en su frecuencia máxima de trabajo y en la incapacidad de mantener un nivel permanente de salida ante una entrada común.

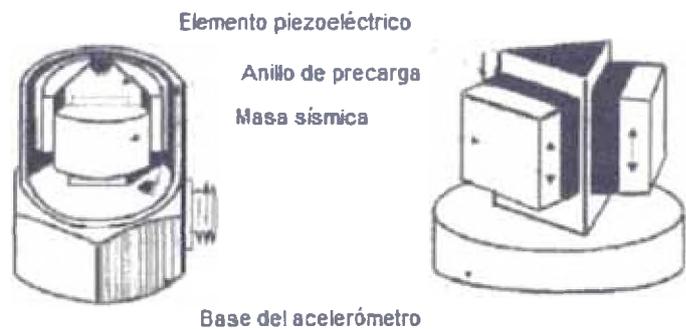


Figura 2.5. Esquema básico de un acelerómetro piezoeléctrico [9].

Así que poniendo un cristal de este tipo entre la carcasa (unida al objeto cuya aceleración se quiere medir) y una masa inercial se producirá una corriente cuando ocurra una aceleración ya que la masa ejercerá una fuerza sobre el cristal. Midiendo esta corriente podremos calcular la aceleración, bien directamente si se trata de un acelerómetro de salida de corriente o bien convirtiéndola a un voltaje de baja impedancia si se trata de un acelerómetro de salida de voltaje.

A la hora de utilizar este tipo de sensores para medir la aceleración podemos encontrar diversos tipos en el mercado con distintos valores de sensibilidad, alcance de la medida, banda de frecuencia de uso, etc., aunque la mayoría suelen ser de dos tipos, los sensores propiamente dichos y los que incorporan un amplificador.

Los sensores piezoeléctricos pre-amplificados van siendo cada vez más habituales por la comodidad de su uso, ya que producen un valor de tensión proporcional a la excitación aplicada

en la salida del amplificador y su comportamiento resulta independiente del conexionado exterior puesto que carga y resistencia de entrada del amplificador se mantienen constante siempre. Este tipo de sensores precisa alimentación.

Los sensores piezoeléctricos propiamente dichos no incorporan más que el dispositivo sensor, careciendo de una salida tan cómoda como los anteriores.

2.3.3 Acelerómetros piezo resistivos (figura 2.6)

Un acelerómetro piezo resistivo a diferencia de uno piezo eléctrico utiliza un sustrato en vez de un cristal piezo eléctrico, en esta tecnología las fuerzas que ejerce la masa sobre el sustrato varían su resistencia, que forma parte de un circuito que mediante un puente de Whetstone mide la intensidad de la corriente. La ventaja de esta tecnología respecto a la piezo eléctrica es que pueden medir aceleraciones hasta cero Hz de frecuencia.

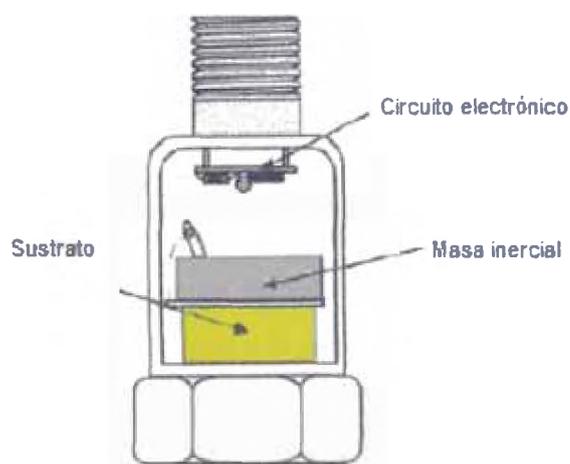


Figura 2.6. Esquema de un acelerómetro piezo resistivo [10].

2.3.4 Acelerómetros capacitivos (figuras 2.7 y 2.8)

Modifican la posición relativa de las placas de un microcondensador cuando está sometido a aceleración. El movimiento paralelo de una de las placas del condensador hace variar

su capacidad. Los acelerómetros capacitivos basan su funcionamiento en la variación de la capacidad entre dos o más conductores entre los que se encuentra un dieléctrico, en respuesta a la variación de la aceleración.

Los sensores capacitivos en forma de circuito integrado en un chip de silicio se emplean para la medida de la aceleración. Su integración en silicio permite reducir los problemas derivados de la temperatura, humedad, capacidades parásitas, terminales, alta impedancia de entrada, etc.



Figura 2.7. Respuesta a una aceleración [10].

El dispositivo realmente trabaja en un lazo de control electrónico de fuerza/balanceo. Este lazo de control evita el movimiento de la masa en aceleración, por la aplicación de una fuerza igual pero opuesta creada por la aplicación de un voltaje en las placas del condensador. Este voltaje aplicado es directamente proporcional a la aceleración.

En este tipo de acelerómetros el elemento que conecta la masa inercial con la carcasa es un condensador. Una de las paredes está fija, pegada a la carcasa y la otra a la masa. Cuando ocurre una aceleración la masa presiona el condensador variando el grosor entre pared y pared. Midiendo la capacitancia del condensador podemos calcular la aceleración. Este tipo de acelerómetros son extremadamente resistentes, pueden soportar aceleraciones de 30000g lo cual permite usarlo en mediciones de aceleración de proyectiles de cañón.



Figura 2.8. Esquema del principio de funcionamiento de un acelerómetro de condensador [10].

2.3.5 Acelerómetros térmicos

Se trata de un nuevo acelerómetro basado en la convección termal. Este tipo de acelerómetro posee un diseño hecho con tecnología de sistemas micro electromecánicos muy simple y práctico al mismo tiempo; simplemente utilizando un sustrato de silicio en el cual se hace un hueco para meter una pequeña resistencia que hace de calentador, con dos termopares en los extremos. Con esta estructura se consigue formar una cavidad de aire caliente, llamada burbuja, sobre los termopares.

La principal característica de estos dispositivos es que tienen sólo un elemento móvil, la burbuja diminuta de aire caliente, herméticamente sellada dentro de una cavidad existente en el encapsulado del sensor. Cuando una fuerza externa como el movimiento, la inclinación, o la vibración es aplicada, la burbuja de aire caliente se mueve de una forma análoga al mismo. El cambio de estado dentro de la cavidad del integrado, produce un voltaje que es función de la diferencia de temperatura y que tras ser amplificado, acondicionado, se proporciona como salida el valor de un voltaje absoluto.

Para el diseño de estos acelerómetros (figura 2.9) se debe crear una zanja en la superficie de silicio que conforma el sustrato del sensor. Se coloca un calentador, resistencia de silicio, suspendida en el centro de la zanja generada, dos termopares a ambos lados del calentador de forma que queden simétricos respecto a este, teniendo como resultado una configuración muy similar a la que presenta el puente de Wheatstone.

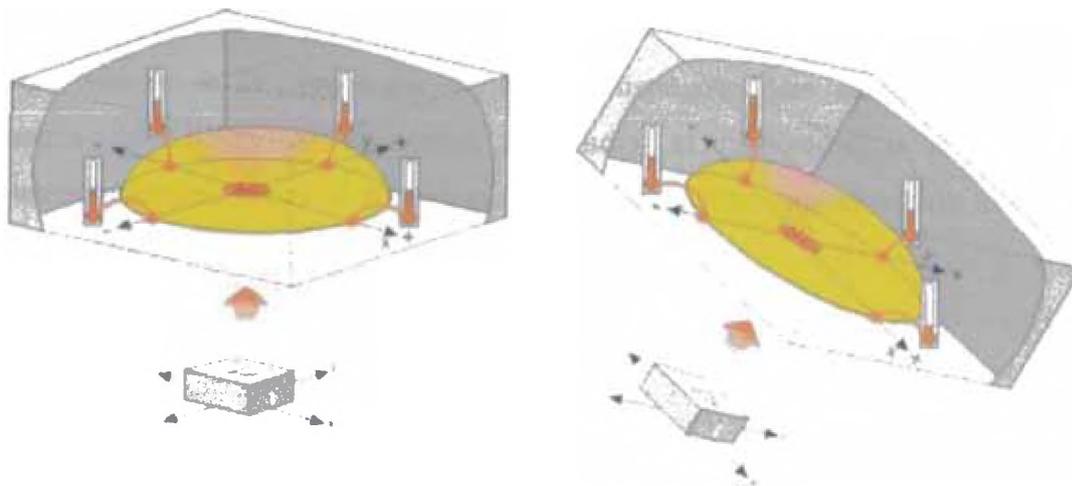


Figura 2.9. Acelerómetro térmico [10].

Es necesario además, al encapsular dejar una cavidad de aire, o burbuja, sobre la que se producirá la variación de las condiciones de temperatura al producirse movimiento. Este cambio de temperatura entre los termopares creará una señal diferencial que será amplificada y condicionada según las aplicaciones para las que esté diseñado el acelerómetro, obteniéndose como salida del mismo.

2.3.6 Acelerómetros micro electromecánicos

Los avances en tecnología de los sistemas micro electromecánicos (MEMS) han permitido la detección del movimiento o los sensores de inercia, conocidos como acelerómetros, para ser puesto en ejecución en muchos usos para las varias industrias.

Los acelerómetros están entre los primeros productos de micro sistemas (MST/MEMS) desarrollados, surgieron en el final de la década de 1980. Sin embargo, para alcanzar un éxito comercial necesitó el desarrollo que surgió durante las décadas de los 70, 80, hasta la del 90 con aplicaciones principalmente en los mercados de la automoción y aeronáutica. Los sensores micrómetro-clasificados miden el movimiento tal como aceleración, vibración, choque, inclinación, e inclinación. Actualmente, con la fabricación en volúmenes muy elevados y a un bajo costo, los acelerómetros están en la mejor posición para moverse con éxito hacia otras aplicaciones, tales como el área médica, industrial y de transporte.

Con relación a la tecnología básica, se distinguen tres categorías principales de acelerómetros de MEMS: el capacitivo de silicio, el piezoresistivo y, finalmente, los acelerómetros térmicos. Hasta el momento, los acelerómetros capacitivos de silicio dominan ampliamente el mercado.

2.4 Aplicaciones

La aceleración es una cantidad física fundamental, manifestada de muchas maneras gravedad, vibración, actividad sísmica, estos son algunos ejemplos. La medición de la aceleración de manera continua, exacta y a bajo costo, abre numerosas aplicaciones para los acelerómetros.

Los acelerómetros están siendo cada vez más atraídos hacia mercados diferentes del automotriz y de la aviación, donde pueden ser usados para medir la inercia. Ellos también miden la inclinación, característica que es usada principalmente para transportes, perforación, telemetría, navegación de ciegos u otras aplicaciones médicas o choques, usado también para mediciones sísmicas, monitoreo del estado de las máquinas. Detallamos algunos de estos ejemplos:

Los fabricantes de computadoras portátiles buscan formas para hacer sus productos más seguros. Los elementos con mayor facilidad de dañarse son los dispositivos de almacenamiento masivo (con la consecuente pérdida de información almacenada), discos duros particularmente. El delicado mecanismo que lee y escribe información a los discos, flota sobre los discos; un movimiento repentino puede provocar fácilmente un problema, destruyéndose la información. Un acelerómetro puede detectar el "ataque del daño potencial", contrarrestar los choques y evitar que se dañe el disco.

Las aplicaciones militares incluyen ingeniosos sistemas de detonación para misiles y bombas. En este caso un acelerómetro forma parte del sistema difuso, la detección de impacto por la rápida desaceleración asociada. La continua variación de salida del acelerómetro sería

rápidamente analizado, estableciendo el instante preciso en que la carga explosiva debe ser detonada produciendo el daño máximo sobre el objetivo.

También puede ser utilizado para monitorizar máquinas de salud, máquinas de rotación para mostrar las características de vibración; grietas o fatigas de las máquinas, monitorizando continuamente la vibración de una máquina, es posible avisar de algún fallo inminente.

En la tabla 2.1 se resumen las principales características de los distintos tipos de acelerómetros y sus aplicaciones.

Tabla 2.1. Características de diferentes acelerómetros.

Tipo	Margen de medida (g)	Ancho de banda (Hz)	Ventajas e inconvenientes	Aplicaciones
MEMS	1.5g – 250g	0.1 – 1500	-Alta sensibilidad -Costo medio -Uso sencillo -Bajas temperaturas	-Impacto -ABS -Airbag -Uso en automoción
Piezoeléctricos	0g – 2000g	10 – 20000	-Sensibilidad media -Uso complejo -Bajas temperaturas -No funciona en continua	-Vibración -Impacto -Uso industrial
Piezo-resistivos	0g – 2000g	10 – 10000	-Respuesta en continua y alterna -Prestaciones medias -Bajo costo -Tamaño y peso mínimos -Alta sensibilidad	-Vibración -Impacto -Automoción -Biodinámica -Ensayos de vuelo -Test de túneles de viento
Capacitivos	0g – 1000g	0 – 2000	-Funciona en continua -Bajo ruido -Baja potencia -Bajo costo	-Uso general -Uso industrial -Sistemas con alarma -Mediciones sísmicas
Mecánicos	0g – 200g	0 – 1000	-Alta presión en continua -Lentos -Alto costo	-Navegación inercial -Guía de misiles -Herramientas -Nivelación

2.5. Arduino

Arduino es una plataforma de hardware libre, basada en una placa con un microcontrolador y un entorno de desarrollo, diseñada para facilitar el uso de la electrónica en proyectos multidisciplinares.

El hardware consiste en una placa con un microcontrolador Atmel AVR y puertos de entrada/salida. Los micro controladores más usados son el Atmega168, Atmega328, Atmega1280, ATmega8 por su sencillez y bajo coste que permiten el desarrollo de múltiples diseños. Por otro lado el software consiste en un entorno de desarrollo que implementa el lenguaje de programación Processing/Wiring y el cargador de arranque (*boot loader*) que corre en la placa.

Arduino se puede utilizar para desarrollar objetos interactivos autónomos o puede ser conectado a software del ordenador (por ejemplo: Macromedia Flash, Processing, Max/MSP, Pure Data). Las placas se pueden montar a mano o adquirirse. El entorno de desarrollo integrado libre se puede descargar gratuitamente.

Al ser open-hardware, tanto su diseño como su distribución es libre. Es decir, puede utilizarse libremente para el desarrollo de cualquier tipo de proyecto sin haber adquirido ninguna licencia.

El proyecto Arduino recibió una mención honorífica en la categoría de Comunidades Digital en el Prix Ars Electronica de 2006.

2.5.1. Arduino Uno [14]

El Arduino Uno (figura 2.10) es una placa electrónica basada en el micro controlador ATmega328 [13]. Cuenta con 14 entradas / salidas digitales (de los cuales 6 pueden ser utilizados como salidas PWM), 6 entradas analógicas, un oscilador de cristal de 16 MHz, una conexión USB, un conector de alimentación, una conexión ICSP y un botón de reinicio. Contiene todo lo necesario para apoyar las funciones del micro controlador, basta con conectarlo a un ordenador con un cable USB o el poder con un adaptador AC-DC o batería para empezar.

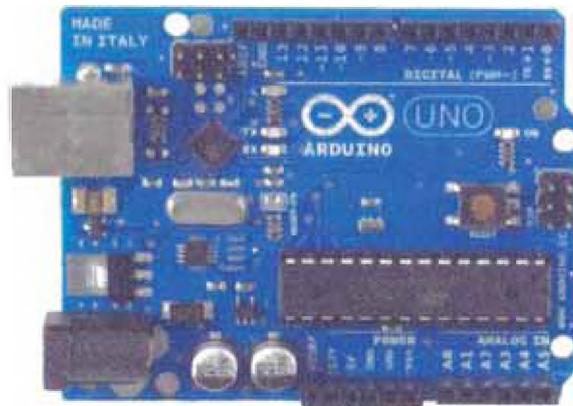


Figura 2.10. Arduino Uno R2.

Tabla 2.2. Descripción Arduino Uno.

Microcontrolador	ATmega328
Voltaje de operación	5 V
Voltaje de entrada (recomendada)	7 – 12 V
Voltaje de entrada (limites)	6 – 20 V
Pines digitales entrada/salida	14 (6 de salida PWM)
Pines de entradas analógicas	6
Corriente por pin entrada/salida	40 mA
Corriente por pin 3.3 V	50 mA
Memoria flash	32 kB (ATmega328) de los cuales 0,5 kB es utilizado por el gestor de arranque
SRAM	2 kB (ATmega328)
EEPROM	1 kB (ATmega328)
Velocidad del clock	16 MHz

El Arduino Uno puede ser alimentado a través de la conexión USB o con una fuente de alimentación externa. La fuente de alimentación se selecciona automáticamente.

Los pines de alimentación son las siguientes:

- VIN. El voltaje de entrada a la placa Arduino cuando se utiliza una fuente de alimentación externa (en comparación con 5 voltios de la conexión USB o de otra fuente de alimentación regulada). El arduino puede ser alimentada a través de este pin.
- 5 V. La fuente de alimentación regulada utilizada para alimentar el microcontrolador y otros componentes en el tablero. Esto puede venir ya sea de VIN a través de un regulador a bordo, o se suministra a través de USB o de otra fuente de 5 V regulados.
- 3V3. Una fuente de 3.3 V generados por el regulador a bordo. Su máximo consumo de corriente es 50 mA.
- GND. Pines a tierra.

Cada uno de los 14 pines digitales en el Arduino Uno se puede utilizar como una entrada o salida, estos operan a 5 V. Cada pin puede proporcionar o recibir un máximo de 40 mA y tiene una resistencia de pull-up (desconectado por defecto) de 20 a 50 k Ω . Además, algunos pines tienen funciones especializadas:

- Serie: 0 (RX) y 1 (TX). Se utiliza para recibir (RX) y transmisión (TX) datos serie TTL. Estos pines están conectados a los pines correspondientes de la ATmega8U2 USB-a-chip de serie TTL.
- Las interrupciones externas: 2 y 3. Estos pines pueden ser configurados para activar una interrupción en un valor bajo, un flanco ascendente o descendente, o un cambio en el valor.
- PWM: 3, 5, 6, 9, 10 y 11. Proveer de 8 bits de salida PWM.
- SPI: 10 (SS), 11 (MOSI), 12 (MISO), 13 (SCK). Pines de comunicación SPI.
- LED: 13. Hay un built-in LED conectado al pin digital 13. Cuando valor del pin es alto (5 V), el LED está encendido, cuando es bajo (0 V), el LED está apagado.

El Arduino Uno tiene 6 entradas analógicas, con la etiqueta A0 a A5, cada una de las cuales ofrecen 10 bits de resolución (es decir, 1024 valores diferentes). Por defecto, el rango de medida es de 0 a 5 V, aunque es posible cambiar el extremo superior del rango con el pin AREF. Además, algunos pines tienen funciones especializadas:

TWI: A4 (SDA) y A5 (SCL). Apoyo de comunicación TWI.

El Arduino Uno cuenta con algunos pines adicionales estos son:

- AREF. Voltaje de referencia para las entradas analógicas.
- Reset. Sirve para restablecer (modo de reset) el microcontrolador.

2.5.2. Arduino Ethernet Shield (Ethernet Shield) [15]

La Arduino Ethernet Shield (figura 2.11) permite a una placa Arduino conectarse a internet. Está basada en el chip ethernet Wiznet W5100 ethernet chip [16]. El Wiznet W5100 provee de una pila de red IP capaz de TCP y UDP. Soporta hasta cuatro conexiones de sockets simultáneas.

La Ethernet Shield dispone de unos conectores que permiten conectar a su vez otras placas encima y apilarlas sobre la placa Arduino.

La última revisión de Ethernet Shield añade una ranura para tarjetas micro-SD, que puede ser usado para almacenar archivos para servir a través de la red.

Arduino usa los pines digitales 10, 11, 12, y 13 (SPI) para comunicarse con el W5100 en la Ethernet shield. Estos pines no pueden ser usados para entradas/salidas genéricas.

La shield provee un conector ethernet estándar RJ45.

El botón de reset en la shield resetea ambos, el W5100 y la placa Arduino.

La shield contiene un número de LEDs para información:

- **PWR:** indica que la placa y la shield están alimentadas.
- **LINK:** indica la presencia de un enlace de red y parpadea cuando la shield envía o recibe dato.
- **FULLD:** indica que la conexión de red es full dúplex.
- **100M:** indica la presencia de una conexión de red de 100 Mb/s (de forma opuesta a una de 10Mb/s).
- **RX:** parpadea cuando la shield recibe datos.
- **TX:** parpadea cuando la shield envía datos.
- **COLL:** parpadea cuando se detectan colisiones en la red.

El jumper soldado marcado como "INT" puede ser conectado para permitir a la placa Arduino recibir notificaciones de eventos por interrupción desde el W5100, pero esto no está soportado por la librería Ethernet. El jumper conecta el pin INT del W5100 al pin digital 2 de Arduino.

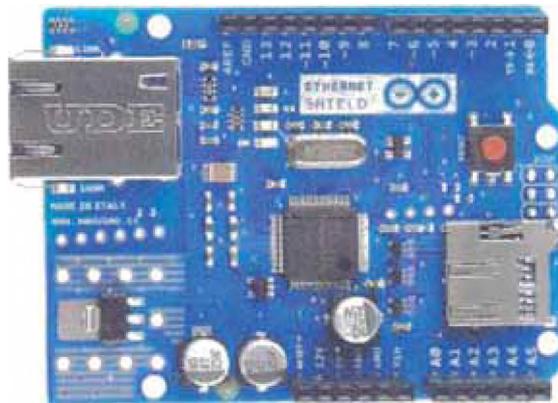


Figura 2.11. Arduino Ethernet Shield.

2.6. Acelerómetro ADXL335 [11]

El ADXL335 (figura 2.12) es un acelerómetro MEMS de 3 ejes, de bajo consumo de energía, tamaño reducido (4mm x 4mm x 1.45mm).



Figura 2.12. Acelerómetro ADXL335.

Este producto mide aceleración con un rango mínimo de escala total de $\pm 3g$. Puede medir aceleración estática de la gravedad en aplicaciones de inclinación, o aceleración dinámica proveniente de movimiento, vibración o golpes. Nos entrega información de aceleración en cada uno de los ejes de medición (x, y, z).

Contiene un sensor de polisilicio micromaquinado (estructura de wafer-on-wafer) además de circuitería de acondicionamiento de señal para implementarlo en una arquitectura de medición de aceleración de lazo-abierto. Las señales de salida son voltajes analógicos que son proporcionales a la aceleración. Tal descripción se aprecia en la figura 2.13.

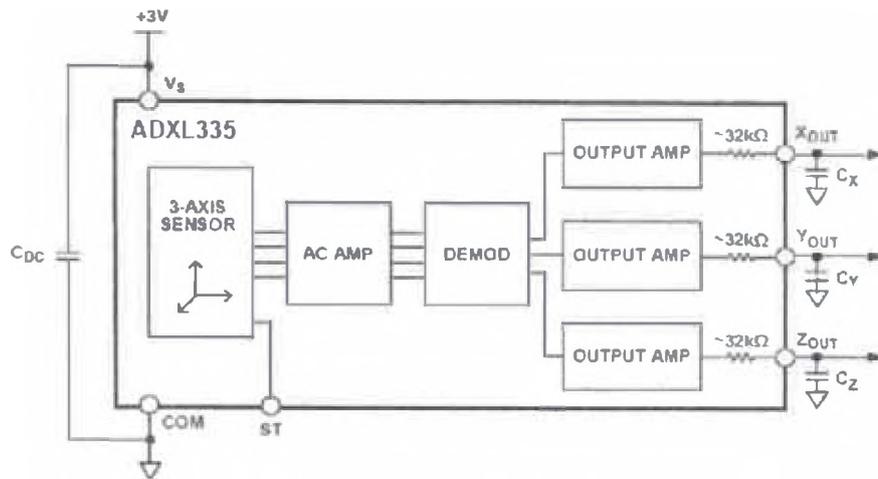


Figura 2.13. Diagrama de funcionamiento.

En la figura 2.14 se indican los ejes de referencia del acelerómetro con respecto a la orientación espacial del encapsulado. En la figura 2.15 se muestran ejemplos de diferentes posiciones del encapsulado y los valores obtenidos como resultado de la medición de la aceleración gravitatoria.

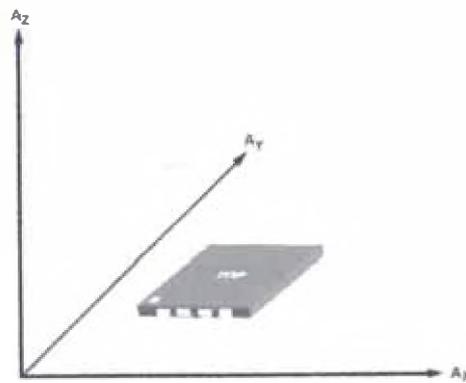


Figura 2.14. Ejes de aceleración.

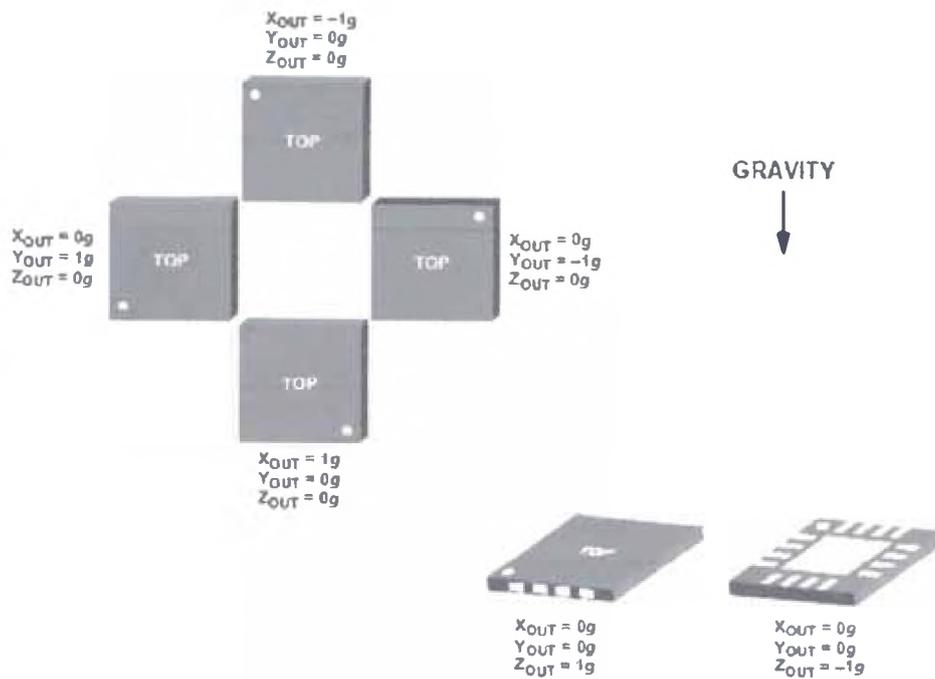


Figura 2.15. Respuesta vs orientación.

2.7. Familiarización con el modelo [18]

Un patrón relevante como característica de una actividad física ya sea caminar o correr es la aceleración. Los tres ejes de movimiento de un individuo son x-side (pitch), y-forward (roll), y z-vertical (yaw), como se muestra en la figura 2.16.

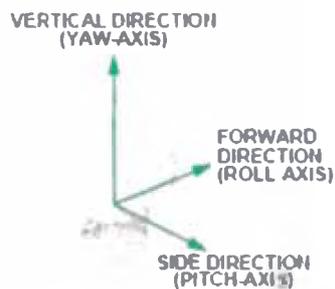


Figura 2.16. Definición de ejes del movimiento.

El sensor ADXL335 detecta la aceleración a lo largo de sus tres ejes (x, y, z). El sensor estará en una orientación desconocida, así que la exactitud de la medida no debe depender críticamente de la relación entre los ejes del movimiento y la medida de los ejes de aceleración.

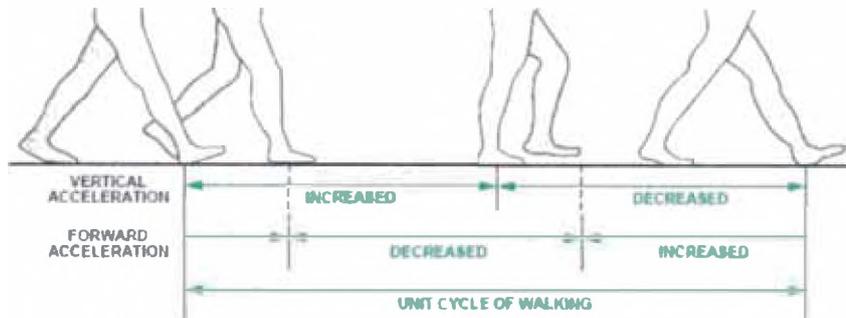


Figura 2.17. Patrón de aceleración al caminar.

Pensemos en la naturaleza del caminar, la figura 2.17 representa un solo paso, definido como un ciclo del comportamiento del caminar, en ella se muestra la relación entre cada etapa del ciclo del caminar y el cambio en la aceleración vertical y horizontal.

La figura 2.18 muestra un patrón típico de las medidas de aceleración en los ejes (x, y, z) que corresponden a la aceleración horizontal, lateral y vertical de una persona corriendo. Por lo menos un eje tendrá cambios periódicos relativamente grandes de la aceleración, sin importar la orientación del sensor.

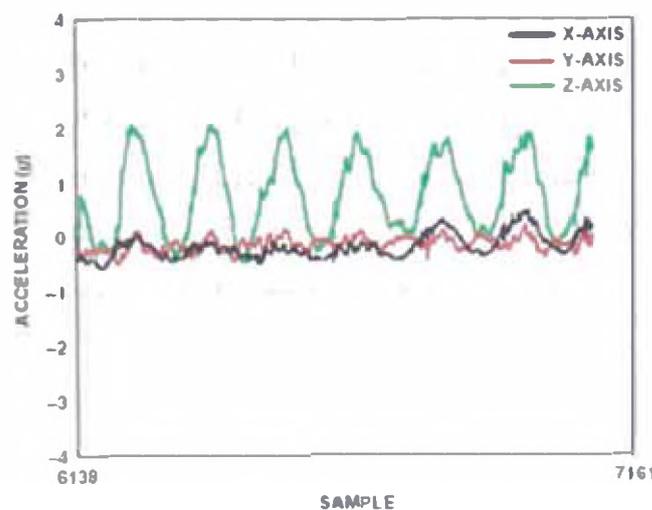


Figura 2.18. Patrón típico de aceleración en los ejes (x, y, z).

3. PROCEDIMIENTOS EXPERIMENTALES

Para la detección de la actividad física se hará uso de un sensor de aceleración (acelerómetro) de tres ejes el cual proporciona tres salidas de voltaje, cada una de ellas correspondiente a los ejes X, Y, Z.

Para el registro de estas señales provenientes del acelerómetro en primera instancia emplearemos un sistema electrónico de adquisición de datos, sistema basado en un microcontrolador y una memoria tipo flash (micro SD), para luego descargar el registro a un PC y observarlo de manera gráfica lo que facilitaría su interpretación.

3.1. Selección del Sensor

En el desarrollo del dispositivo se emplea el sensor de aceleración ADXL335 por su tamaño reducido, bajo costo, bajo consumo de energía.

Puede medir aceleración estática de la gravedad en aplicaciones de inclinación, o aceleración dinámica proveniente de movimiento, vibración o golpes. Nos entrega información de aceleración en cada uno de los ejes de medición (x, y, z).

Como se mencionó anteriormente este integrado es un sistema completo de medición de la aceleración en tres ejes, incluyendo un circuito de acondicionamiento de señal que nos da un voltaje análogo de salida dependiendo del voltaje con el cual es alimentado (Vs). Dicho voltaje es radiométrico, es decir que para un voltaje de 2 V se tiene una sensibilidad típica de 195mV/g, mientras a 3.6 V nos da un resultado de 360 mV/g. La salida a zero g también es radiométrica, teniendo que el voltaje nominal de salida para un valor de 0 g es Vs/2.

El ruido de salida no es radiométrico siendo en cambio absoluto, por ello la densidad del ruido decrece a medida que el voltaje de entrada aumenta. Esto es a causa del incremento en el factor de la escala (mV/g) mientras que el ruido de voltaje permanece constante. A $V_s = 3.6 \text{ V}$, los ejes X e Y tienen una densidad de ruido típica de $120 \mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}}$, mientras que con un $V_s = 2 \text{ V}$, la densidad de ruido de ambos ejes es de $270 \mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}}$.

La corriente que consume decrece junto con el voltaje de entrada. El consumo de corriente típico a $V_s = 3.6 \text{ V}$ es de $375 \mu\text{A}$, mientras a $V_s = 2 \text{ V}$ es $200 \mu\text{A}$.

Este sensor tiene un rango de operación de -40 a $+85 \text{ }^\circ\text{C}$.

3.2. Sistema Electrónico de Adquisición de Datos (SEAD)

En la estructura del SEAD, se usara en conjunto las placas electrónicas Arduino UNO (2.5.1.) y Ethernet Shield (2.5.2.). Obteniéndose las siguientes características resaltantes:

- Uso del micro controlador ATmega328.
- 14 entradas / salidas digitales (de los cuales 6 pueden ser utilizados como salidas PWM).
- 6 entradas analógicas.
- Ranura para tarjetas micro-SD, para el registro de los datos.
- Conexión a una red local de internet.
- Proveer un voltaje regulado y estable al sensor ADXL335, mediante el uso de su regulador de voltaje.
- Leer las 3 señales de salida que entrega el sensor ADXL335, con el convertidor analógico a digital (ADC) que tiene integrado.
- Calcular la aceleración en los ejes de orientación como también la aceleración total.

El Arduino, tiene un regulador de voltaje, que además de poder ser alimentado con un mínimo de 6 V y un máximo de 20 V tiene 2 salidas de voltaje para alimentar sensores, una de 5 V y otra de 3.3 V . La que se usara para el sensor ADXL335.

3.2.1. Acondicionamiento

La señal de un sensor suele ser validada para su procesado. Por lo general requiere de una amplificación para adaptar sus niveles a los del resto de la circuitería. También se tiene que aislar y filtrar la señal del ruido, ya sea provocado por vibración o por efectos electromagnéticos que son bastante comunes en el ambiente de uso.

No solo hay que adaptar niveles, también puede ser que la salida del sensor no sea lineal o incluso ésta dependa de las condiciones de funcionamiento por lo que hay que linealizar el sensor y compensar sus variaciones. La compensación puede hacerse por hardware o por software, en este último caso ya no es parte del acondicionador.

Las primeras experiencias con este sensor, se tuvieron directamente en una tableta de desarrollo (protoboard), y conectados a un microcontrolador (ATMEL ATMEGA328) como se aprecia en la figura 3.1.

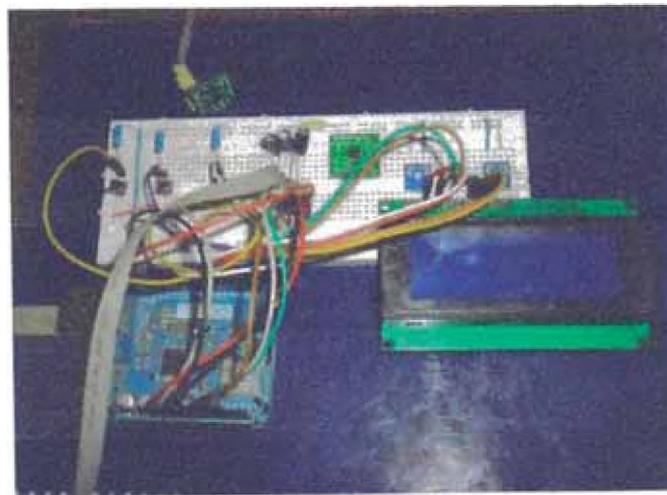


Figura 3.1. Sensor ADXL335 montado en un protoboard.

3.2.2. Adquisición de Datos

Para un procesamiento de la señal eficaz hay que convertir la señal en digital. La instrumentación también estudia la conversión analógica-digital, así como la conversión digital-analógica. Ahora nos centraremos en la parte de la conversión analógica-digital, el ADXL335 nos entrega voltajes analógicos, uno por cada señal de salida (ejes x, y, z).

El Arduino tiene un convertidor analógico digital (ADC) que cuenta con 6 canales de entrada analógica, el diagrama de conexión entre el sensor y el Arduino se aprecia en la Figura 3.2.

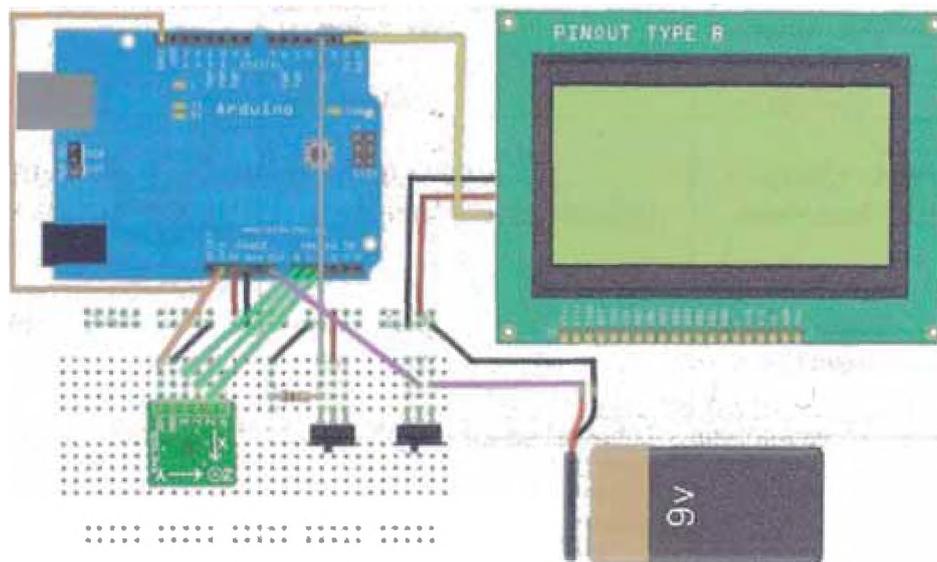


Figura 3.2. Conexión entre el sensor ADXL335 y Arduino.

La conexión entre la alimentación y el pin AREF del Arduino es para poder escalar de manera correcta al ADC, de esta manera el valor máximo del ADC 1024 corresponderá a 3.3 V y no a 5 V que es la configuración por defecto.

Se ha usado el idioma inglés en la programación del Arduino, para poder llevar la filosofía de open source, y que sea más fácil de entender para una audiencia internacional cuando este se libere.

El ADC del Arduino es de 10 bits de resolución, está conectado a un multiplexor de 6 canales que permite 6 entradas simples de voltaje. El ADC convierte un voltaje de entrada a través de aproximaciones sucesivas. El valor mínimo es representado por la conexión a tierra (GND) mientras que el valor máximo esta dado por AREF.

A continuación se presenta el código de lectura (figuras 3.3, 3.4) de las señales analógicas dadas por el sensor ADXL335 y su posterior conversión a valores de g; así como también, se presenta el diagrama de flujo de la programación de SEAD (figura 3.5).

<i>//Sub routines</i> <i>// Reading analogic input signal</i>		
Eje x	Eje y	Eje z
<pre><i>int</i> sense_x(){ <i>int</i> i; <i>int</i> xval=0; for (i=0;i<20;i++){ xval=xval+<i>analogRead</i>(0); } xval=xval/20; return xval; }</pre>	<pre><i>int</i> sense_y(){ <i>int</i> i; <i>int</i> yval=0; for (i=0;i<20;i++){ yval=yval+<i>analogRead</i>(1); } yval=yval/20; return yval; }</pre>	<pre><i>int</i> sense_z(){ <i>int</i> i; <i>int</i> zval=0; for (i=0;i<20;i++){ zval=zval+<i>analogRead</i>(2); } zval=zval/20; return zval; }</pre>

Figura 3.3. Código de lectura de las señales analógicas.

```
// Main program g values
void loop() {
  vx=sense_x();
  vy=sense_y();
  vz=sense_z();

  x=(vx-zero_x)/sensitivity_x;
  y=(vy-zero_y)/sensitivity_y;
  z=(vz-zero_z)/sensitivity_z;
  A=sqrt(sq(x)+sq(y)+sq(z));
}
```

Figura 3.4. Código de conversión a valores de g.

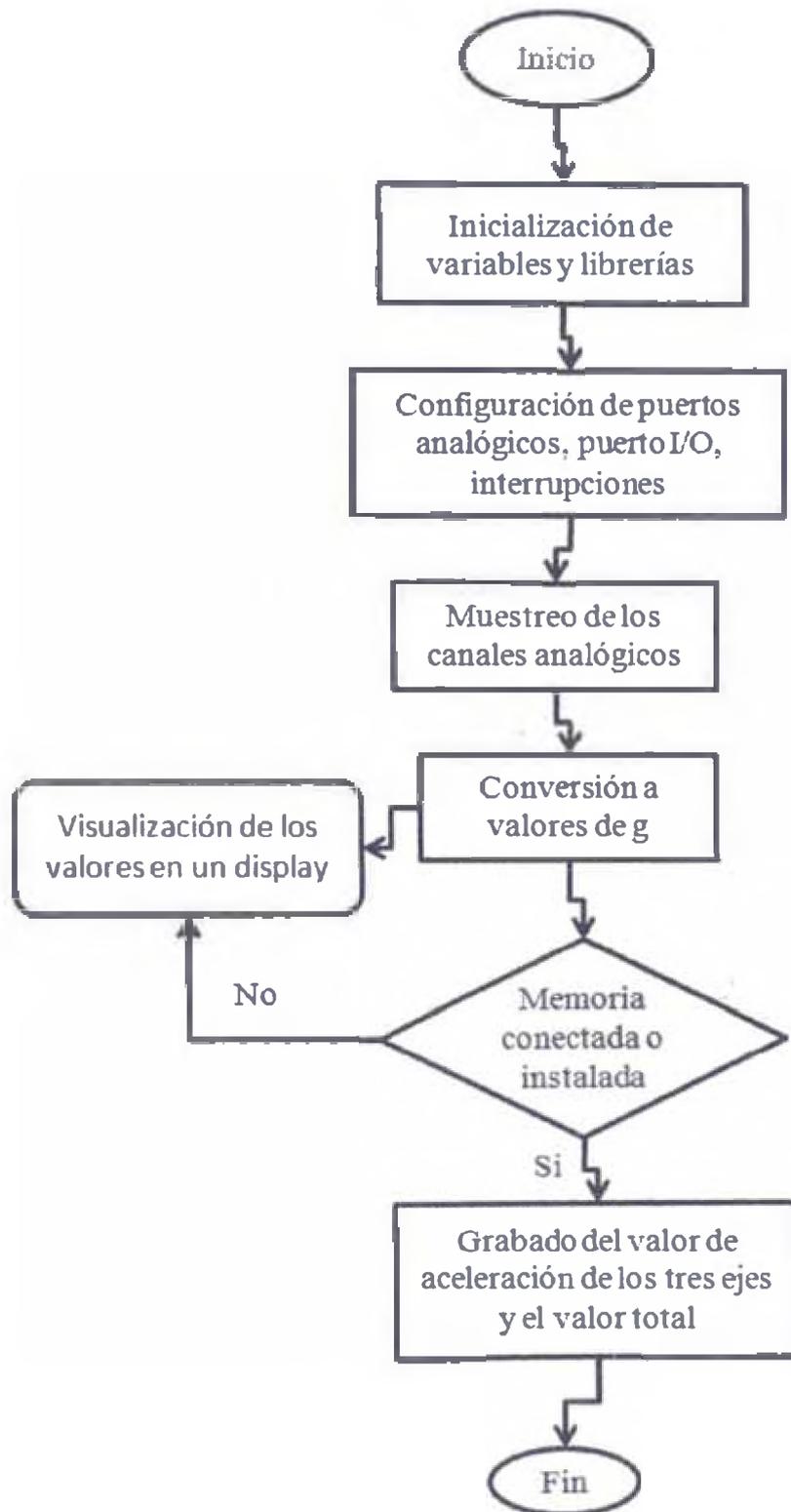


Figura 3.5. Diagrama de flujo de la programación del SEAD.

3.3. Detección de la Actividad Física con el Acelerómetro ADXL335 (Tres ejes)

En el presente proyecto este acelerómetro permite realizar una detección dinámica de los movimientos de la persona que porta el dispositivo. Para ello se conecta cada una de las salidas de los ejes a las entradas analógicas del SEAD para procesar la señal (figura 3.6).

El propósito principal es la detección, el registro y la clasificación de cuatro actividades físicas principalmente, si la persona se encuentra en reposo, si camina, corre o salta. Para poder crear un sistema que nos permita detectar con precisión dichos eventos primero se deben realizar pruebas de control con 2 personas (A y B) que realizarán tres actividades físicas durante un minuto cada una, caminar, correr y saltar.

De esta manera podemos observar en los datos registrados en la PC la manera en la que se comporta el acelerómetro al ser sometido a los movimientos de la persona.

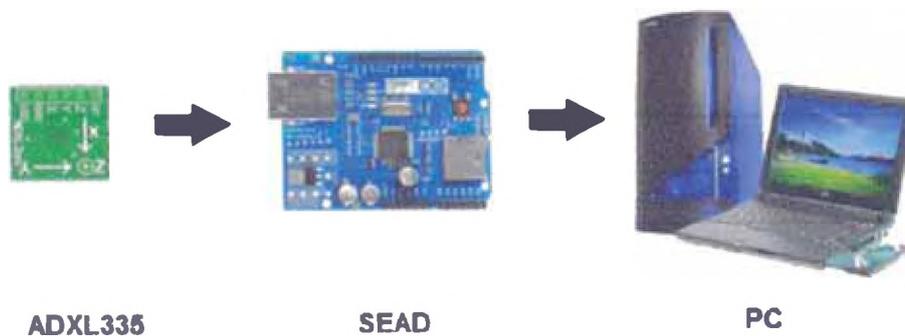


Figura 3.6. Diagrama del sistema de detección de actividad física.

3.3.1. Registro de la actividad física

El desarrollo de la actividad física (caminar, correr y saltar) fue de 2 minutos. El sensor va sujeto a la cintura de la persona (lado derecho), el sensor está posicionado de forma tal que el eje Z se tiene una medición de 1 g a su salida, como se muestra en la figura 3.7.

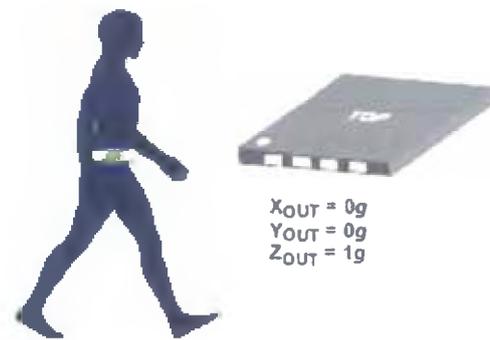


Figura 3.7. Posicionamiento del acelerómetro con respecto a la persona.

En la realización de las actividades físicas se solicitó la colaboración de familiares y amigos. Como se mencionó anteriormente cada una de las personas caminó, corrió y saltó por dos minutos, los datos obtenidos de cada prueba fueron registrados en la memoria micro SD por el SEAD, luego descargados a la PC para su análisis, cada archivo contiene aproximadamente 200 registros por eje.

4. RESULTADOS EXPERIMENTALES

De los datos obtenidos por el SEAD se obtuvieron las siguientes graficas pertenecientes a las pruebas realizadas Tabla 4.1.

Tabla 4.1. Figuras y actividades realizadas.

Figura	Actividad
4.1	Caminando (persona A)
4.2	Caminando (persona B)
4.3	Corriendo (persona A)
4.4	Corriendo (persona B)
4.5	Saltando (persona A)
4.6	Saltando (persona B)

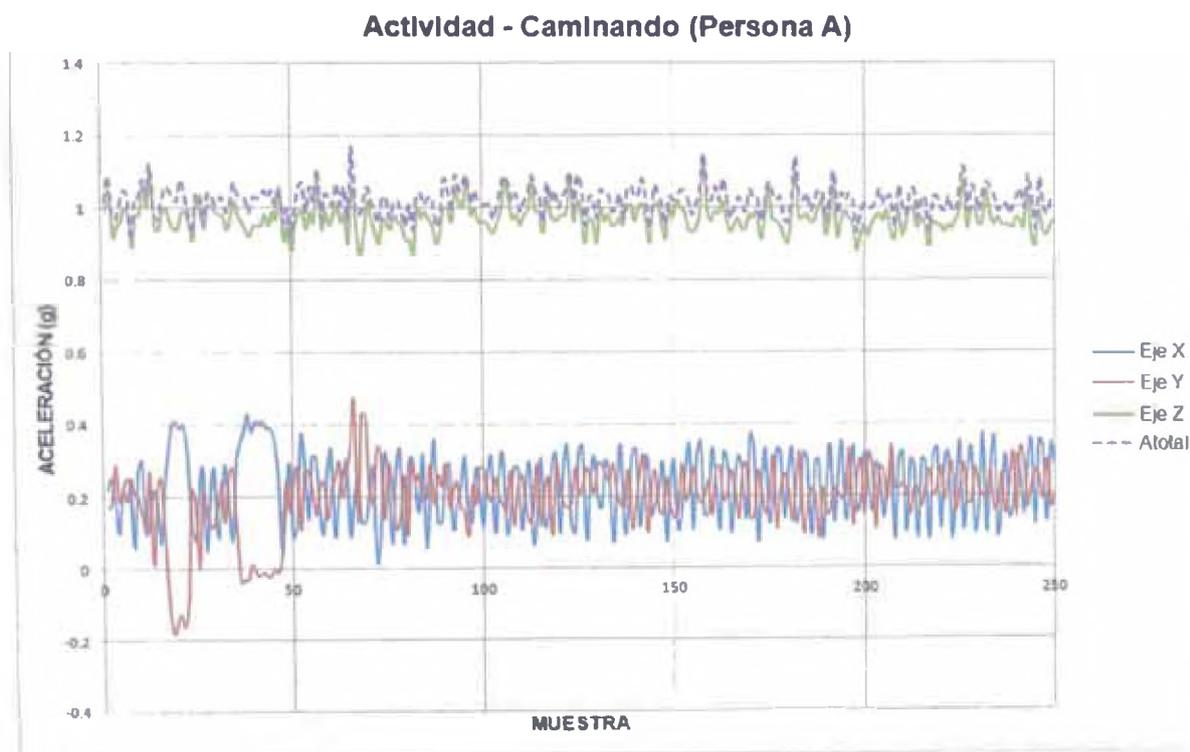


Figura 4.1. Actividad: Caminando (Persona A).

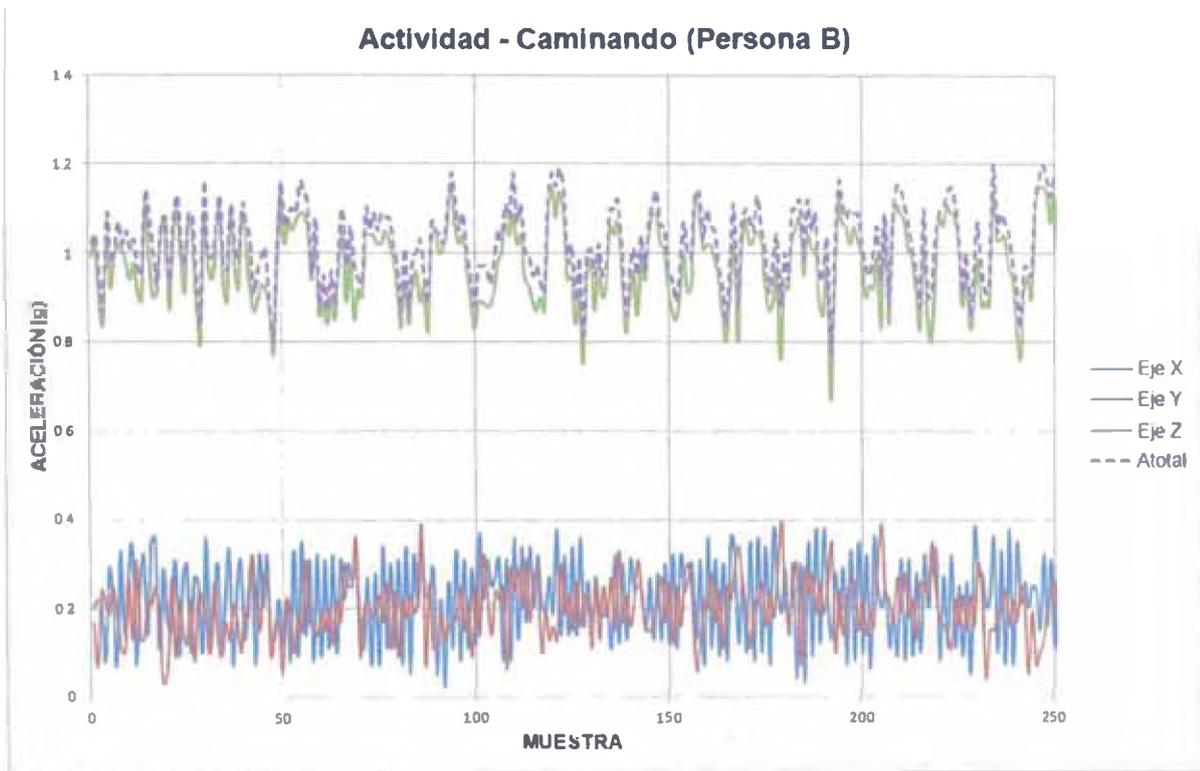


Figura 4.2. Actividad: Caminando (Persona B).

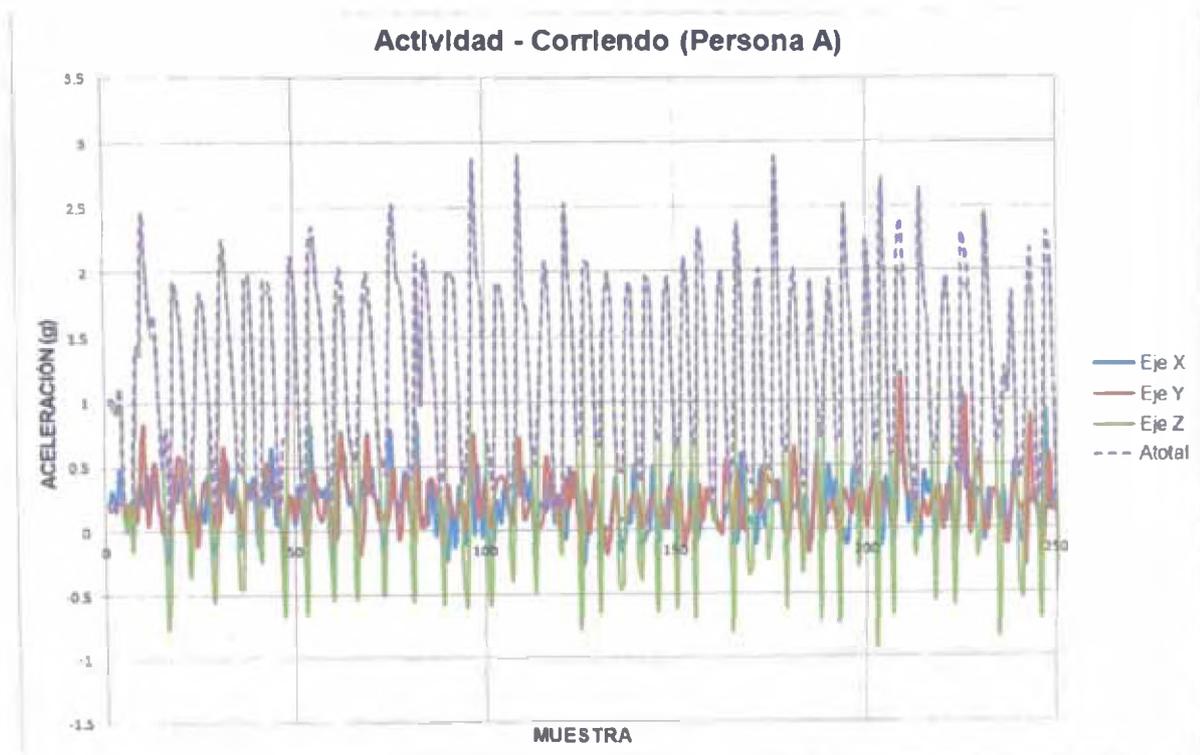


Figura 4.3. Actividad: Corriendo (Persona A).

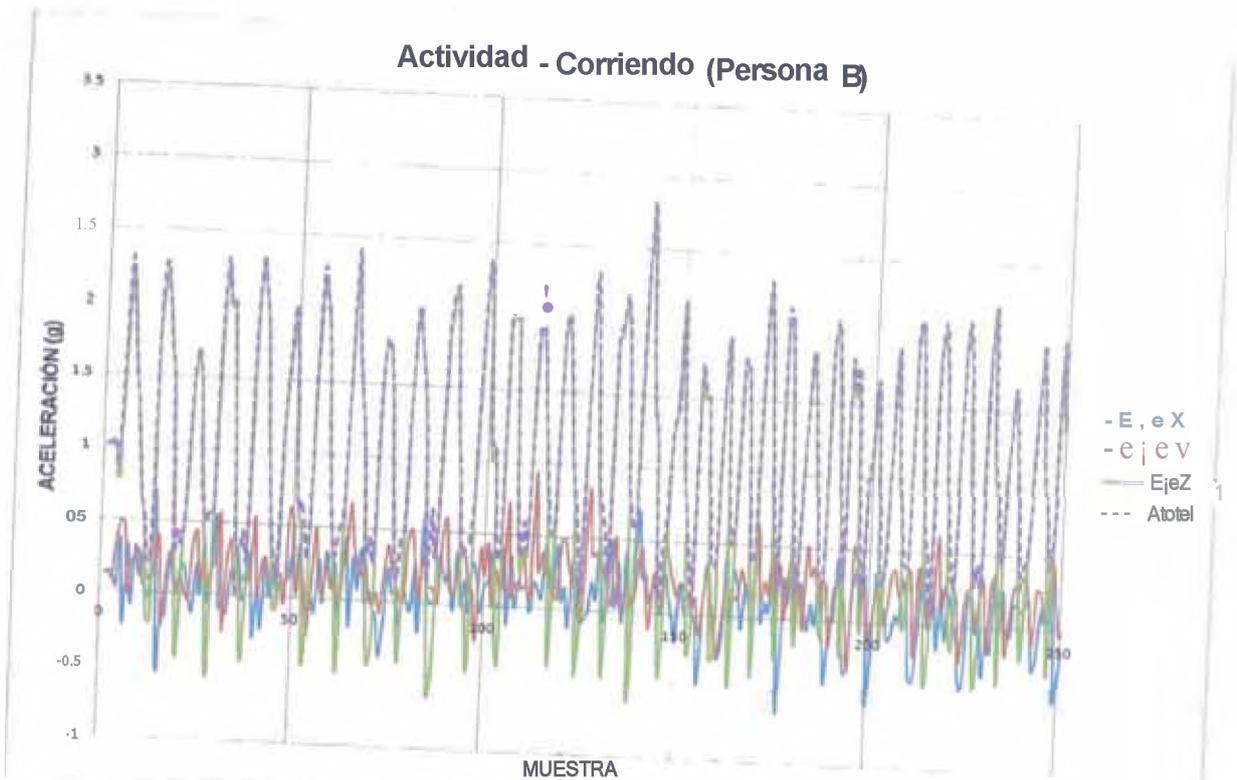


Figura 4.4. Actividad: Corriendo (Persona B).

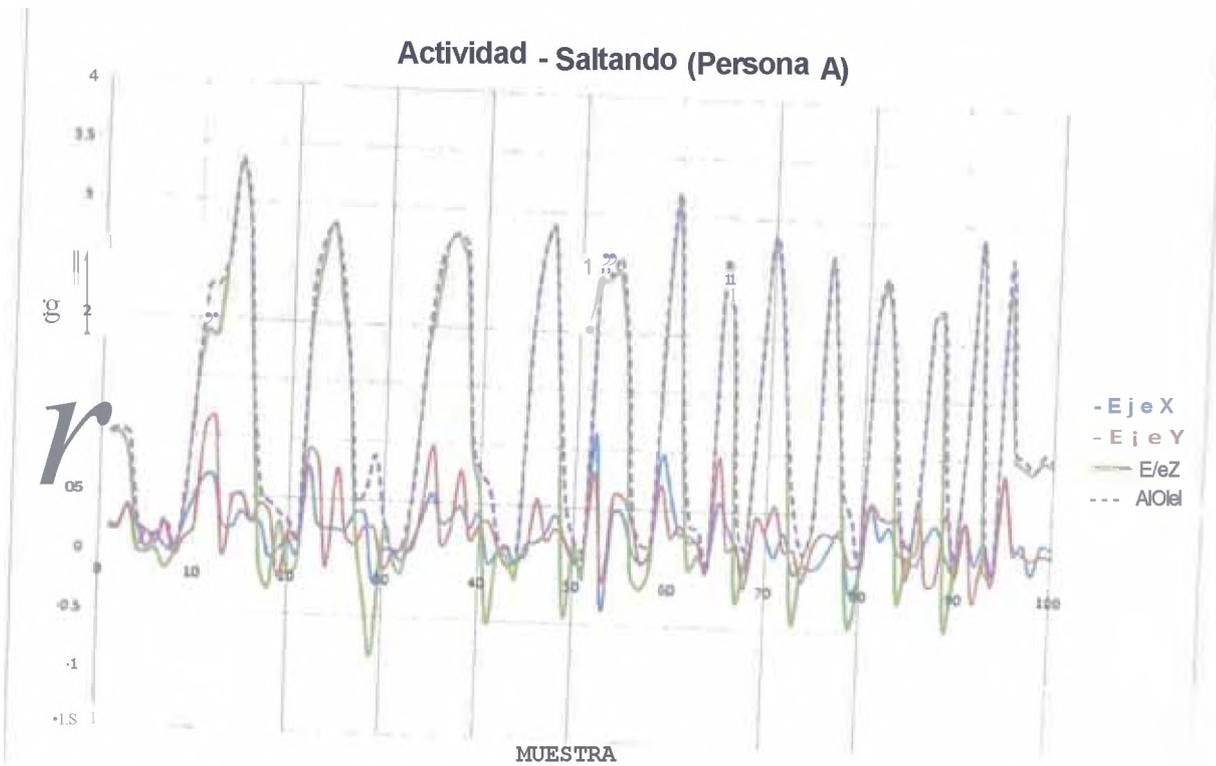


Figura 4.5. Actividad: Saltando (Persona A).

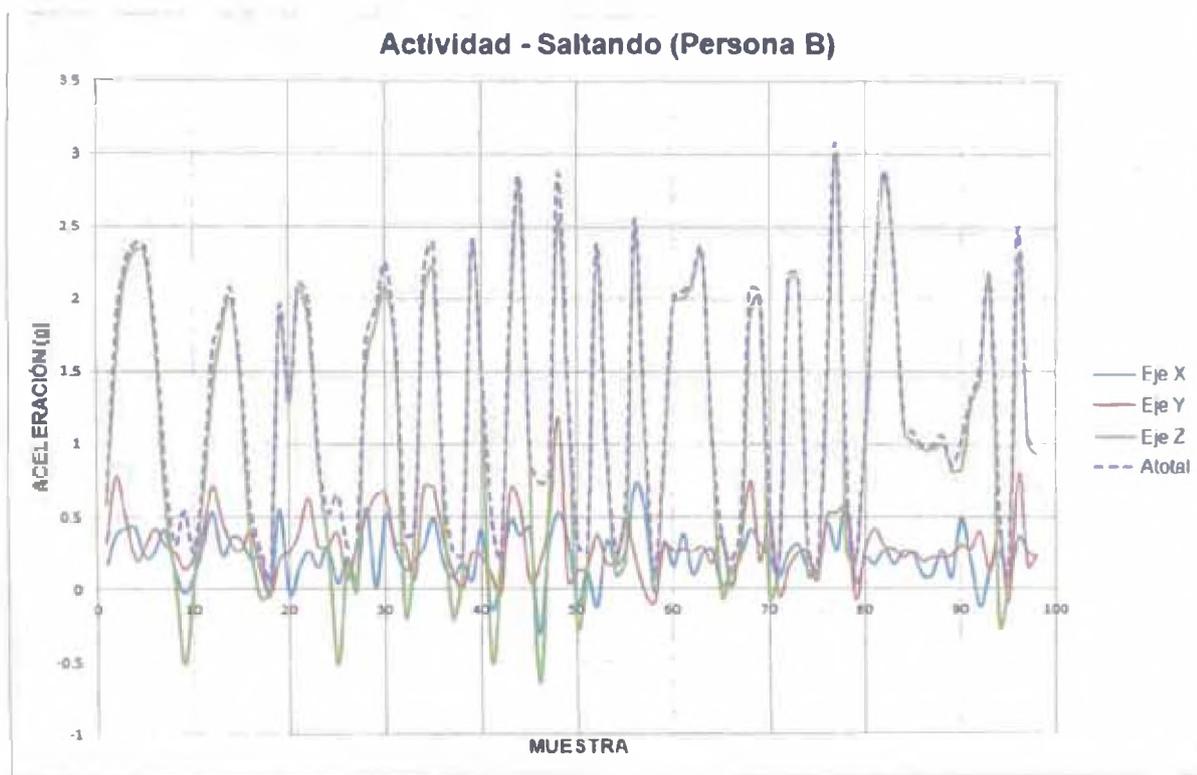


Figura 4.6. Actividad: Saltando (Persona B).

5. DISCUSIÓN

De las figuras 4.1 y 4.2 (actividad – caminando) se observa de en ambas pruebas un patrón ligero de picos cercanos al valor de 1 g (eje z), estos picos se deben al paso que se da con la pierna derecha, lugar cercano al acelerómetro, siendo el otro pico pequeño el de la pierna izquierda, así como también se observa la vibración de la persona al andar. Hay que destacar que cada persona tiene un patrón único de locomoción y eso se ve reflejado en la señal que arroja el acelerómetro.

De las figuras 4.3 y 4.4 (actividad – corriendo), se observan picos altos de aceleración y otros un poco reducidos, que serían los pasos dados por la pierna derecha e izquierda respectivamente, se distingue esta prueba de la anterior debido a una mayor frecuencia en los picos altos.

Por último de las figuras 4.5 y 4.6 (actividad – saltando), se observa de una forma marcada el movimiento de la persona, al mostrarse un solo pico por cada salto.

De los datos recogidos por el SEAD se obtuvieron estas gráficas (figuras 4.1 a 4.6) que nos permiten ver las fuerzas a las que está sometida una persona en la realización de las actividades descritas (caminar, correr y saltar), sin embargo para poder llegar a una conclusión se realizó un análisis de todas las pruebas realizadas donde se calcularon diversas medidas estadísticas como la media (promedio), la varianza y la desviación estándar en cada una de las pruebas que realizó cada persona.

5.1. Análisis cuantitativo de los registros obtenidos

Las siguientes tablas muestran el resultado obtenido de calcular las diversas medidas estadísticas, estos son: la media (promedio), la varianza y la desviación estándar de las actividades realizadas por cada persona.

El análisis solo se realizara en el eje Z, ya que es el eje que acompaña el movimiento realizado por la persona, así como también proporciona el valor dominante en el cálculo de la aceleración total A_{total} que es la raíz cuadrada de la suma de los cuadrados de la aceleración dada por los ejes (x, y, z).

Tabla 5.1 Actividad - caminando, media, varianza y desviación estándar.

Actividad física: Caminar		Media (g)	Varianza (g)	Desviación Estándar (g)
Eje Z	Persona A	0.969	0.002	0.042
	Persona B	0.971	0.009	0.093
A total	Persona A	1.023	0.002	0.040
	Persona B	1.022	0.008	0.087

Tabla 5.2. Actividad - corriendo, media, varianza y desviación estándar.

Actividad física: Correr		Media (g)	Varianza (g)	Desviación Estándar (g)
Eje Z	Persona A	0.989	0.924	0.961
	Persona B	0.975	0.711	0.843
A total	Persona A	1.260	0.492	0.701
	Persona B	1.154	0.458	0.677

Tabla 5.3. Actividad - saltando, media, varianza y desviación estándar.

Actividad física: Saltar		Media (g)	Varianza (g)	Desviación Estándar (g)
Eje Z	Persona A	1.051	1.374	1.161
	Persona B	1.079	0.889	0.943
A total	Persona A	1.283	1.091	1.045
	Persona B	1.258	0.694	0.833

Al observar los cálculos estadísticos se observa que la media no ofrece una distinción clara entre las actividades realizadas, esta se mantiene alrededor de los 0.97 y 1.29, por cual descartamos esta medida.

Dependiendo de la actividad realizada; en cambio, la varianza y la desviación estándar muestran diferencias entre sí.

Como la desviación estándar muestra rangos mas definidos entre las pruebas realizadas, llegamos a la conclusión de utilizar este parámetro de la desviación estándar de la aceleración total para realizar la clasificación de la actividad física, lo cual nos permite establecer umbrales que limiten cada actividad.

Para ello necesitamos establecer rangos y umbrales para poder clasificar cada actividad. Con la información anterior de dichos valores, tomando el valor más bajo y el más alto en cada una de las pruebas y ampliando un poco más el umbral entre las actividades, a medida que se realicen más pruebas, pudiendo ajustar dichos valores hasta llegar a un resultado óptimo.

Tabla 5.4. Rangos de la desviación estándar para la detección de la actividad física.

Actividad	Mínimo (g)	Máximo (g)
Reposo	0	0.04
Caminar	0.04	0.10
Correr	0.10	1.00
Saltar	1.00	En adelante

La figura 5.1 demuestra que el sistema no es perfecto, que cuando existen transiciones entre actividades físicas es posible que se clasifiquen de forma errónea. Sin embargo, al observar todas las pruebas se hace visible que el porcentaje de error es mínimo, estamos hablando de que en casi todas se tuvo más de un 85 por ciento de efectividad a la hora de clasificar la actividad física. Siendo muy satisfactorio este porcentaje.

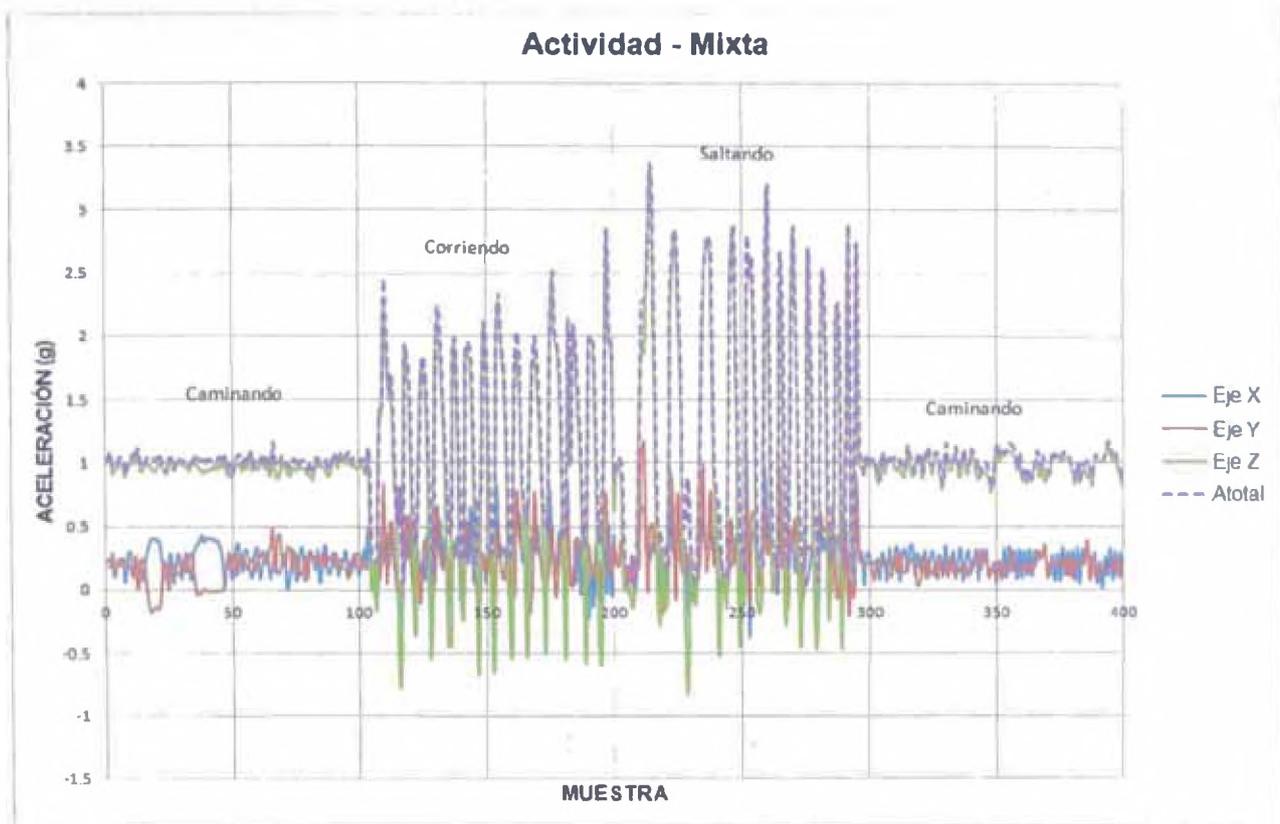


Figura 5.1. Actividad mixta.

6. CONCLUSIONES

Se logró el desarrollo de un sistema electrónico de adquisición de datos (SEAD) de bajo consumo de energía, bajo costo y portátil, basado en los módulos Arduino Uno + Ethernet shield, lográndose así el registro de la información en una memoria SD (micro SD).

Se logró la integración del sistema electrónico de adquisición de datos a un sensor de aceleración.

Se logró desarrollar un sistema con un algoritmo eficiente que detectó de forma satisfactoria la actividad física mediante el uso de un acelerómetro de tres ejes. Para realizar la clasificación de la actividad física se llevaron a cabo pruebas, de las cuales se obtuvieron medidas estadísticas, con esos datos se llegó a la conclusión de que realizando el cálculo de la desviación estándar se podía obtener el resultado esperado: la clasificación de la actividad física. Además, con dichas pruebas se establecieron umbrales que delimitan cada actividad.

Un margen de mejora considerable sobre el sistema es el desarrollo de un software de reconocimiento de patrones de actividades físicas para determinar si una persona se encuentra caminando, corriendo o saltando.

7. REFERENCIAS

- [1] Mikati I. Holter Monitor, Verimed Healthcare Network, (2010).
- [2] Dorf R., Sensors Nanoscience, Biomedical Engineering, and Instruments, The Electrical Engineering Handbook Third Edition, (1997).
- [3] John G. Webster, Encyclopedia of Medical Devices and Instrumentation, Second Edition, Volume 1, Pag. 12-13, (2006).
- [4] Estudio Holter, Texas Heart Institute, (2010).
- [5] American Heart Association “Holter Monitor Diary”, (2010).
- [6] L. Landau y F. Lifschitz, 1989, Physique Théorique, Tome 2: Théorie des Champs, 4 Ed. Revue et complétée (1 Ed. 1964), MIR, Moscou, Pag. 293-294.
- [7] S. Merhav, Aerospace Sensor Systems and Applications, Springer, New York, (1996).
- [8] I. McLaren, Open and Closed Loop Accelerometers, AGARD-AG-160-Vol.6, (1975)
- [9] Wilson S. Jon, Sensor Technology HANDBOOK. Burlington MA. USA. Elsevier Inc, Chapter 5. Pag. 137-155, (2005).
- [10] Marta Arenas Mas, Diseño e implementación de un sistema de adquisición de aceleraciones con procesamiento mediante microcontrolador, Sevilla, Capítulo 4. Pag. 39 – 54, (2008).
- [11] <http://www.sparkfun.com/datasheets/Components/SMD/adx1335.pdf> consultado el 2011-04-28.
- [12] <http://bibing.us.es/proyectos/abreprov/11638/fichero/Capitulo+4.pdf> consultado el 2011-05-01.
- [13] http://www.atmel.com/dyn/resources/prod_documents/doc8161.pdf consultado el 2011-07-10.
- [14] <http://arduino.cc/en/Main/ArduinoBoardUno> consultado el 2011-07-28.
- [15] <http://www.arduino.cc/en/Main/ArduinoEthernetShield> consultado el 2011-07-29.

- [16] http://www.sparkfun.com/datasheets/DevTools/Arduino/W5100_Datasheet_v1_1_6.pdf consultado el 2011-08-15.
- [17] <http://wiibrew.org/wiki/Wiimote#Accelerometer> consultado el 2011-09-10.
- [18] <http://www.analog.com/library/analogdialogue/archives/44-06/pedometer.html> consultado el 2011-10-05.