

IMPLEMENTACION DE LA SENSÓRICA PARA UN EXOESQUELETO PASIVO DE MIEMBROS INFERIORES.

Ivan Adrián Mendoza Diusaba

Universidad Militar Nueva Granada

Facultad de Ingeniería

Programa de Mecatrónica

Bogotá D.C. 2011

IMPLEMENTACION DE LA SENSÓRICA
PARA UN EXOESQUELETO PASIVO DE
MIEMBROS INFERIORES.

Ivan Adrián Mendoza Diusaba

Auxiliar de investigación para optar el título de Ingeniero en Mecatrónica

Investigador tutor: Ing. Nelson Velasco

Universidad Militar Nueva Granada

Facultad de Ingeniería

Programa de Mecatrónica

Bogotá D.C. 2011

Índice general

1. Introducción.	5
1.1. Definición del problema.	5
1.2. Objetivos de la investigación.	6
1.3. Antecedentes.	6
2. Sistemas en tiempo real.	13
2.1. Clasificación de los sistemas en tiempo real.	14
2.2. Características de los sistemas de tiempo real.	14
3. Sistema de captura de movimiento.	17
3.1. Sensores.	17
3.2. Software del microcontrolador PIC.	21
3.3. Módulo de comunicación.	28
3.4. Verificación de los datos en el computador.	30
4. Pruebas y resultados del sistema	33
5. Conclusiones y trabajos futuros	38
Bibliografía	44

DEDICATORIA.

El mundo es un baúl de conocimientos y la vida es una línea de aprendizaje donde día a día es más larga, pero esto no se hace solo, por eso quiero darle las mas infinitas gracias a Dios por darme la vida y la salud para asumir este reto con todas las fuerzas posibles, pero especialmente le doy gracias a mi mama porque sin ella este logro no hubiera sido posible ya que ella me brindo todo su ánimo, su corazón y sobre todo el amor de madre que es el que me ha llevado a finalizar este sueño con las mejores ganas y fuerzas. Por último darle gracias a todas y a cada una de las personas que mucho o poco ayudaron a que este sueño hoy se convierta en una realidad.

Capítulo 1

Introducción.

En la Universidad Militar Nueva Granada se desarrolla un proyecto de investigación el cual consiste en realizar un exoesqueleto para miembros inferiores, este sistema se compone de una fase pasiva y una fase activa. Actualmente el proyecto se encuentra en el desarrollo de la primera fase es decir la parte pasiva; en la esta fase el exoesqueleto se compone de una parte mecánica la cual consiste en la construcción del modelo físico del exoesqueleto y una parte electrónica en la cual se desarrolla la parte del sistema de captura de movimiento para poder obtener las variables cinemáticas que se obtienen a la hora de la marcha.

Los exoesqueletos actualmente se utilizan en diferentes aplicaciones como lo son la rehabilitación de personas, en la industria militar, etc. Este proyecto prácticamente se basa en lograr aumentar la fuerza a una persona normal para lograr el menor esfuerzo físico por parte de la persona que lo porte. En la primera fase la cual consiste en la elaboración de un modelo pasivo del exoesqueleto se presenta el problema de lograr detectar las diferentes variables cinemáticas que generara el modelo mecánico.

En el capítulo se observara la definición del problema, los objetivos del proyecto y los antecedentes de trabajos ya realizados en el área de la investigación.

1.1. Definición del problema.

La idea general de un exoesqueleto es que este ayude a la persona a desarrollar diferentes tareas sin interferir la acción natural del ser humano, para poder lograr que el exoesqueleto no interfiera en la actividad de la persona que lo lleva es su exterior es necesario realizar un control de movimiento de dicho exoesqueleto.

A la hora de desarrollar un sistema de control para un exoesqueleto lo primero que se debe tener en cuenta es la captura de las señales que genera el movimiento de la estructura y así poder realizar un procesamiento de dichas señales para lograr comparar la marcha humana con la marcha del exoesqueleto.

Este proyecto de investigación se enfoca en realizar un sistema de adquisición de las señales que genera un exoesqueleto de miembros inferiores. En el siguiente numeral se mencionaran los objetivos del proyecto de investigación.

1.2. Objetivos de la investigación.

- Objetivo general:

- Implementar un sistema para el registro de variables cinemáticas durante la marcha.

- Objetivos específicos:

- Realizar la medición de las variables cinemáticas de los miembros inferiores por medio de acelerómetros.
 - Realizar el acondicionamiento necesario para que los datos de los acelerómetros puedan ser transmitidos por vía inalámbrica.
 - Realizar labores de diseño y construcción de los sistemas para adquisición de datos y procesamiento de señales para un exoesqueleto pasivo de miembros inferiores.

A continuación se mencionara algunos trabajos que se han realizado relacionados con el proyecto de investigación.

1.3. Antecedentes.

En esta sección se hará una breve reseña acerca de los diferentes trabajos que se han elaborado en el campo de los sistemas de captura de movimiento y algo de trabajos realizados sobre exoesqueletos que se enfocan un poco más en el proyecto global.

Un importante estudio que se realizó sobre los exoesqueletos fue el que realizó el Ingeniero israelí Amit Goffer, fundador de la empresa tecnológica Argo Medical Technologies, ha creado un exoesqueleto electrónico capaz de ayudar a caminar a las personas parapléjicas. Aunque el paciente necesita muletas para

mantener el equilibrio, el sistema cuenta con un mando a distancia que se ajusta a la muñeca y que pone en funcionamiento una serie de sensores corporales gracias a los cuales se motorizan las piernas, permitiendo el movimiento.

Los pacientes pueden elegir qué tipo de movimiento desean como sentarse, andar, bajar o subir escaleras a través del mando a distancia, que sólo necesita unas pilas recargables. Desde Argo Medical Technologies no creen que puedan ofrecer una alternativa práctica a las sillas de ruedas antes de 2010, cuando se pondrá a la venta este exoesqueleto con un precio de 20.000 dólares.

Según el profesor Goffer, con este sistema “los pacientes podrán levantarse directamente de su silla de ruedas”. Aunque este ingeniero sufre paraplejía, paradójicamente no puede hacer uso de su invento al carecer de plena movilidad en los brazos.

Actualmente, el sistema se está utilizando en ensayos clínicos en el Centro Médico de Tel-Aviv (Israel), y posteriormente llegará al Instituto de Investigación de Rehabilitación de Pensilvania (Estados Unidos) [1].

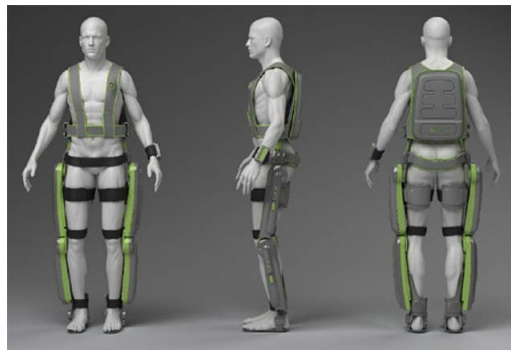


Figura 1.1: Exoesqueleto creado por Argo Medical Technologies

Otro importante desarrollo en el área de los exoesqueletos es el Hal es el primer exoesqueleto biónico que se fabricará en masa y estará disponible para el cliente final en cualquier establecimiento, sin tener que obtener ningún permiso especial. El Hal con un mínimo esfuerzo incrementa la fuerza del usuario. Este traje robótico, dice el sitio oficial: “ lee las señales nerviosas que son enviadas al cerebro por los músculos vía una motoneurona, que mueve el sistema músculo esquelético como consecuencia. En ese momento, débiles bioseñales pueden ser detectadas en la superficie de la piel. Hal agarra esas señales a través de un sensor adjunto en la piel del usuario. Basado en las señales que obtiene, la unidad de poder responde a las actividades diarias del usuario.”[3]

Después de mirar un poco acerca de lo que son los exoesqueleto se pasara a hablar sobre la base del proyecto de investigación que se trata sobre los sistemas de captura de movimiento en los últimos años y para esto se toma como referencia un prototipo de un sistema de captura de movimiento desarrollado en la UNAM de México, este prototipo es de un sistema que permite registrar y visualizar en tiempo real el movimiento de las articulaciones del cuerpo humano. La principal ventaja de este sistema es que puede operar completamente, aún utilizando un equipo PC de bajo costo; otras ventajas importantes son: el bajo costo de hardware del sistema y de los sensores, no requiere de ambientes controlados y el tiempo requerido para su calibración es mínimo

El prototipo del sistema está formado básicamente por 3 partes.

- Un conjunto de sensores que detectan el movimiento de las articulaciones.
- Un circuito que permite digitalizar las señales de los sensores.
- Una aplicación encargada de adecuar y visualizar la información, este software se ejecuta en una computadora que se denomina como externa.

Los sensores están hechos de materiales flexibles y permiten medir la magnitud de la deformación a que son sometidos. En caso de que el sensor sea doblado, el voltaje en sus terminales puede relacionarse con el ángulo de flexión. Si se acopla uno de estos sensores a una articulación y esta se dobla deformando al sensor, entonces es posible registrar su movimiento. El circuito del sistema permite capturar la información de 64 sensores, la magnitud del voltaje en las terminales de cada uno de ellos es digitalizada y enviada a una computadora externa por medio de un puerto serial. El circuito entrega las lecturas de los sensores en forma de un vector de 64 enteros delimitados por un par de caracteres especiales.

<#a0a1a2a3....a63#>

Hardware de Captura—————Driver

Los caracteres especiales permiten a la computadora externa reconstruir el vector de datos. La lectura correspondiente a cada sensor es un entero cuyo valor varía de 0 a 255, si se quiere interpretar como un ángulo se debe aplicar una transformación lineal:

$$\text{AnguloFlexión} = \text{LecturaSensor} * \text{Factor} + \text{Offset}$$

El circuito está formado básicamente por un multiplexor analógico y un microcontrolador el cual tiene un módulo de conversión A/D y otro de comunicación serial. En la siguiente figura se muestra esquemáticamente este circuito.

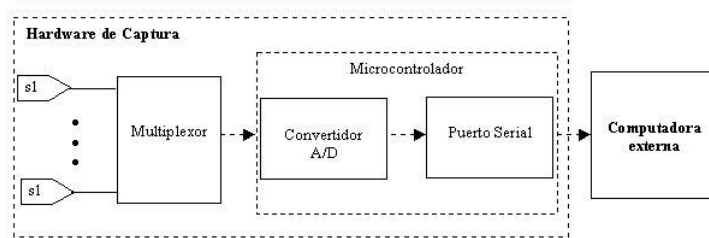


Figura 1.2: Hardware del sistema de captura de movimiento

El software del sistema se ejecuta en la computadora externa y permite leer la información proveniente del hardware de captura. El comportamiento de los datos capturados puede visualizarse directamente en la aplicación, o bien puede transferirse a otras aplicaciones. En el primer caso, la visualización se realiza utilizando un modelo formado por una estructura de eslabones que representan al cuerpo humano, esta estructura es similar a un maniquí que emula los movimientos al tiempo que estos son capturados. En el segundo caso, las aplicaciones pueden conectarse al software a través de un socket y así obtener la información al tiempo que esta es capturada.

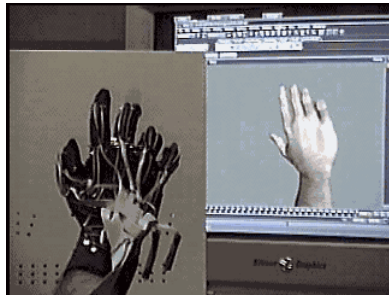


Figura 1.3: Sistema de captura de movimiento

Otro trabajo importante que se realizó sobre los sistemas de captura de movimiento es el Diseño y Validación de un Exoesqueleto Maestro-Esclavo para Rehabilitación de Piernas desarrollado en la UNAB por miembros de la IEEE. En artículo se presenta el diseño de un exoesqueleto de tipo maestro-esclavo que busca facilitar la rehabilitación del movimiento de una pierna lesionada

partiendo del patrón generado por una pierna sana. El sistema se enfoca en asistir los movimientos rotacionales de la cadera, rodilla y tobillo, dentro del plano sagital.[16]

El exoesqueleto consta de: una estructura pasiva con sensores para grabar las trayectorias de una pierna, y de una estructura activa encargada de inducir dichos movimientos sobre la otra pierna con el uso de actuadores. En la figura se observa algunas vistas del diseño final concebido, donde la pierna derecha es el sistema activo y la pierna izquierda el sistema pasivo.

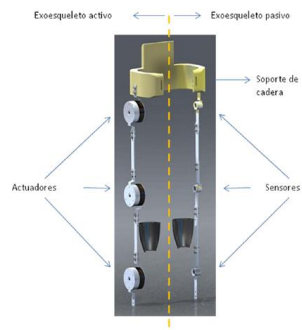


Figura 1.4: Exoesqueleto de miembros inferiores

La instrumentación electrónica involucrada en el desarrollo del sistema, permite convertir las señales de desplazamiento angular en una magnitud eléctrica, para luego transmitirla y procesarla a fin de obtener visualizaciones y respuestas del sistema para accionar y controlar los actuadores. El diseño electrónico es de gran importancia ya que nos permite establecer relaciones entre la mente y el cuerpo del sistema, de la manera más eficaz posible. En la siguiente figura se presenta un diagrama con las etapas electrónicas desarrolladas en el proyecto.

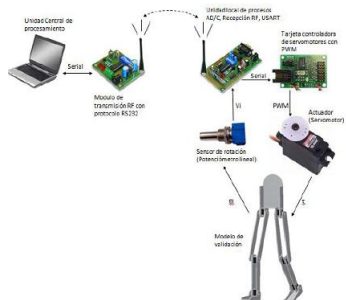


Figura 1.5: Sistema de captura de movimiento del exoesqueleto

Los sistemas de captura de movimiento en los exoesqueletos son ampliamente utilizados en diferentes aplicaciones de medicina, aplicaciones militares, realidad virtual, etc. A continuación se menciona un sistema de captura de movimiento desarrollado en la Universidad Nacional de Asunción - Paraguay en el grupo de investigación de electrónica y Mecatrónica.

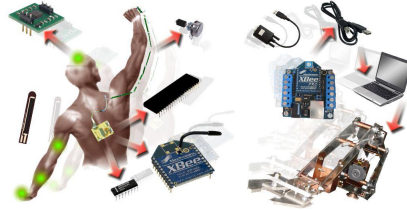


Figura 1.6: Sistema de captura de movimiento para exoesqueleto de miembros superiores

Este proyecto se basa en la construcción de un exoesqueleto del brazo derecho el cual tiene 7 grados de libertad el cual cada grado es para cada articulación que se desea sensar, en la siguiente figura se mostrara el diseño de los exoesqueletos con los diferentes grados de libertad del modelo.

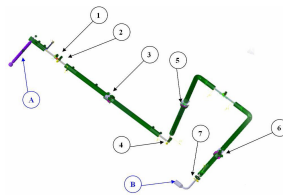


Figura 1.7: Exoesqueleto de 7 grados de libertad para el brazo derecho

Además de eso el proyecto consta de un guante con sensores de flexión para medir los diferentes movimientos de las articulaciones de los dedos, estos sensores se comportan como resistencias por lo cual era necesario colocar un divisor de voltaje para poder tomar una mejor lectura de los datos de la mano de la persona, en esta parte del proyecto se genera una relación entre ángulos y voltajes para lograr medir la flexión de los sensores implementados en el guante.[5]



Figura 1.8: Guante con sensores de flexion.

Ese proyecto utiliza un circuito de transmisión de datos básico que consta de los sensores, un conversor A/D, un microcontrolador y el transmisor que en ese caso es un ZigBee.

Como se pudo observar en los diferentes antecedentes es muy útil realizar un sistema de captura de movimiento para estructuras como la de un exoesqueleto para miembros inferiores.

Ya que se realizó la introducción al trabajo de investigación, en el siguiente capítulo se hablará sobre el marco teórico correspondiente a la investigación.

Capítulo 2

Sistemas en tiempo real.

Los sistemas de tiempo real pueden llevar muchas veces al control de diferentes eventos que suceden en la vida diaria o el mundo real, por lo cual el sistema responde a diferentes estímulos externos dentro de un tiempo específico. Un sistema de tiempo real se define simplemente como un sistema informático que tiene la capacidad de interactuar rápidamente con su entorno físico y puede este realizar tareas de supervisión y/o control.[8]

Otros autores como Alan Burns y Andy Wellings presentan la definición de un sistema de tiempo real (STR) es la siguiente: *“Un sistema en Tiempo Real es cualquier sistema donde el tiempo en que se produce su salida es significativa. Esto es debido a que generalmente la entrada corresponde a algún instante del mundo físico y la salida tiene relación con ese mismo instante. El retraso transcurrido entre la entrada y la salida debe ser lo suficientemente pequeño para considerarse una respuesta puntual”.*[11]

Sencillamente un sistema de tiempo real es un sistema que interactúa activamente con un medio físico. Los STR no solo dependen de la exactitud de los resultados de computo si no también del momento de entrega de los resultados, los STR son sistemas que se caracterizan por tener que producir una salida como respuesta a una entrada en un tiempo determinado, el intervalo de tiempo que presenta a la entrada y la salida debe ser bastante pequeño para que la respuesta del sistema sea aceptable[8]. Los sistemas de tiempo real (STR) manejan una estructura la cual se observara en la siguiente figura.

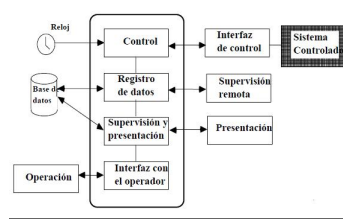


Figura 2.1: Estructura de un sistema de tiempo real

2.1. Clasificación de los sistemas en tiempo real.

Los sistemas de tiempo real se pueden clasificar de dos tipos de acuerdo al tratamiento adecuado de los errores que puedan presentar dichos sistemas, se clasifican en sistemas de tiempo real blandos o sistemas de tiempo real duros. A continuación se mencionara cada uno de ellos un poco más a fondo.

- **Sistemas de tiempo real blandos (Soft real-time systems):** representan aquellos sistemas con restricciones de tiempo en las que una respuesta tardía no produce graves daños pero sí un deterioro del funcionamiento global.
- **Sistemas de tiempo real duros (Hard real-time systems):** son aquellos sistemas en los que el tiempo de respuesta debe garantizarse a toda costa. Una respuesta tardía puede tener consecuencias fatales.[10]
- **Incrementales:** la calidad de la respuesta obtenida depende del tiempo disponible para su cálculo. Si se les da más tiempo la respuesta mejora.

2.2. Características de los sistemas de tiempo real.

Los sistemas en tiempo real poseen las siguientes características:

- **Determinismo:** el determinismo es una cualidad clave en los sistemas de tiempo real, es la capacidad de determinar con una alta probabilidad, cuanto tiempo que se toma alguna tarea en iniciarse. Esto es importante porque los sistemas de tiempo real necesitan que ciertas tareas se ejecuten antes de que otras puedan iniciar. Esta característica se refiere al tiempo

que tarda el sistema antes de responder a una interrupción. Este dato es importante saberlo porque casi todas las peticiones de interrupción que se generan por eventos externos al sistema, así que es importante determinar el tiempo que tardara el sistema en aceptar esta petición de servicio.

- **Responsividad:** la responsividad se enfoca en el tiempo que tarda una tarea en ejecutarse. Los aspectos a los que se enfoca son.
 - La cantidad de tiempo que se lleva el iniciar la ejecución de una interrupción
 - La cantidad de tiempo que se necesita para realizar la tarea que pidió la interrupción.
 - Los efectos de interrupciones anidadas. [15, 8]

Una vez que el resultado del cálculo de determinismo y responsividad es obtenido, se convierte en una característica del sistema y un requerimiento para las aplicaciones que correrán en él.

- **Usuarios controladores:** todos los usuarios tienen un mejor control de todos los procesos que se ejecutan en el sistema esto es.
 - Los procesos son capaces de especificar su prioridad
 - Los procesos son capaces de especificar el manejo de memoria que requiere
 - Los procesos especifican que derechos tiene sobre el sistema.
- **Confiabilidad:** en los STR la confiabilidad es una característica clave, ya que el sistema no debe de presentar fallas, pero más aun la calidad del servicio que se presta no debe de degradarse más allá de un límite especificado. El sistema tiene que tener la capacidad de seguir funcionando aunque se presenten grandes catástrofes, o fallos mecánicos. Por lo general una degradación en el servicio en un STR lleva consecuencias catastróficas.
- **Operación a prueba de fallas duras (Fail soft operation):** al hablar de tolerancia a los fallos se refiere a la capacidad de un sistema de conservar la máxima capacidad y los máximos datos posibles en caso de un problema grave que afecte alguna parte del sistema. Cuando se refiere a la tolerancia a las fallas se está hablando también de la estabilidad ya que un sistema de tiempo real cuando le es imposible cumplir todos los plazos de ejecución de las tareas que tenía asignado en ese momento, el sistema cumple los plazos de las tareas más críticas y de mayor prioridad que hasta ese momento se estaban ejecutando. [15, 8]

Como se puede observar en el capítulo los sistemas en tiempo real son muy útiles y bastante utilizados en la actualidad por ese motivo el proyecto se basa en

este tipo de sistemas y sus diferentes características las cuales serán muy útiles a la hora del desarrollo del proyecto de investigación. El sistema que se está desarrollando puede llegar a considerarse como un sistema en tiempo ya que el muestreo de las señales se basa en interrupciones las cuales garantiza el periodo de muestreo de las señales de los acelerómetros, además se puede considera como un sistema de tiempo real blando ya que algún retardo de las señales de los acelerómetros no afectaría de manera trascendental la visualización de dichos datos en el computador.

Capítulo 3

Sistema de captura de movimiento.

En este capítulo se abordara el sistema de captura de movimiento el cual se puede considerar como un sistema en tiempo real blando.¹



Figura 3.1: Diagrama en bloques del sistema de captura de movimiento

En la figura 3.1 se observa el diagrama en bloques del sistema de captura de movimiento el cual consta de 4 elementos como lo son la sensorica, el software del microcontrolador, el módulo de transmisión y la visualización de los datos . Durante el desarrollo del capítulo se hará una descripción detallada de cada bloque del sistema, mirando sus componentes y sus características que los involucran en el sistema.

3.1. Sensores.

Esta sección trata la parte de sensorica del sistema, en la cual se describirá el sensor utilizado en el proyecto y sus respectivas características.

Para este proyecto se utilizan los sensores llamados acelerómetros. Un acelerómetro es un sensor que captura la variable física de la aceleración y la convierte en variable eléctrica que en este caso es voltaje. Los módulos de los acelerómetros que se utilizan en el proyecto miden las aceleraciones instantáneas (en cada

¹véase en el capítulo 2

uno de los ejes del sistema ortogonal) del movimiento al que es sometido el sensor. Para este sistema se utiliza una tarjeta MMA7260Q la cual contiene un acelerómetro y su respectivo acondicionamiento para que su implementación sea más sencilla. Esta tarjeta que usa el acelerómetro MMA7260QL el cual es un acelerómetro de 3 ejes que cuenta con cuatro niveles de sensibilidad seleccionable (1.5g, 2g, 4g y 6g) además de eso esta tarjeta incluye los filtros externos necesarios para el funcionamiento del acelerómetro. Tiene además una regleta de 2x5 de 0.1" de espaciamiento entre pines para facilitar su conexión.²

El acelerómetro MMA7260Q funciona como un sensor capacitivo, es decir, se clasifica dentro del grupo de los acelerómetros capacitivos y estos operan con una técnica donde la capacitancia del elemento interno cambia en proporción a la aceleración aplicada.

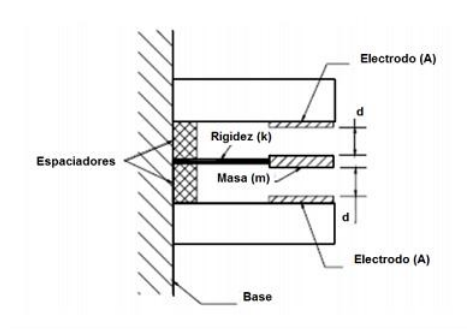


Figura 3.2: Acelerómetro en su estado inicial

En la figura 3.2 se muestra un acelerómetro en su estado inicial, es decir, su aceleración es 0, la figura representa el sensor el cual consta de dos placas conductoras paralelas, un tipo de electrodo con área de expansión (A) y una masa m suspendida por medio de un elemento de rigidez (k). Entre la masa y los electrodos existe una distancia base (d) simétrica, por lo que el aire que existe en el hueco entre cada electrodo y la masa sísmica forma un “capacitor mecánicamente variable”. Cuando el elemento es acelerado de acuerdo con la Segunda Ley de Newton, se presenta una fuerza inercial (F), proporcional a la aceleración que sufre la masa (m), este efecto se puede observar en la figura 3.3.

²véase en el datasheet de MMA 7260Q

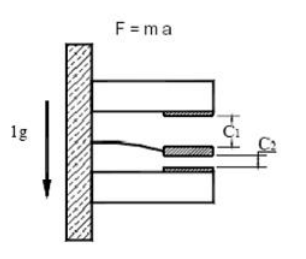


Figura 3.3: Acelerómetro con aceleración de 1g

Esa fuerza hace que la masa se mueva cierta distancia (x) cercana o lejana, respectivamente al electrodo inferior y al electrodo superior. Puesto que el elemento de soporte tiene una rigidez (k), la distancia de separación se expresa como:

$$x = F/k(3 - 2) \quad (3.1)$$

El cambio en la distancia corresponde a los cambios en la capacitancia (C):

$$C_1 = \frac{(A\epsilon)}{(d + x)} \quad (3.2)$$

$$C_2 = \frac{(A\epsilon)}{(d - x)} \quad (3.3)$$

Donde: A es el área del electrodo, ϵ corresponde a la permisividad del aire (constante dieléctrica), d es la distancia entre la masa y el electrodo en la condición de $0g$ y x es el desplazamiento de la masa. Estos acelerómetros incorporan circuitos micro-eléctricos, que usan puentes capacitivos para convertir el cambio de capacitancia a una señal de voltaje útil.[18]

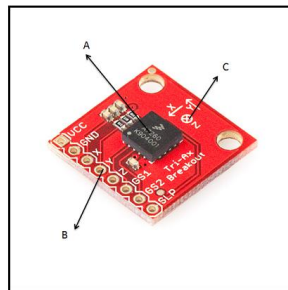


Figura 3.4: Tarjeta MMA 7260, a) Acelerómetro MMA 7260Q b) Distribución de pines c) Ejes del acelerómetro

En la tarjeta de la figura 3.4 se puede observar el acelerómetro MMA7260Q, su distribución de pines y los ejes con su respectiva dirección, este sensor permite detectar las aceleraciones que genera la marcha humana mediante la siguiente fórmula.

$$a = \frac{d^2r}{dt^2} \quad (3.4)$$

Para determinar la velocidad y la posición simplemente se realiza la integral de la ecuación (3.4) y se obtienen las siguientes expresiones.

$$v = \int \frac{d^2r}{dt^2} = \frac{dr}{dt} \quad (3.5)$$

$$r = \int \int \frac{d^2r}{dt^2} \quad (3.6)$$

A la hora de utilizar el sensor es necesario realizar un acondicionamiento sencillo para que este pueda acoplarse a un convertor A/D, en el caso del proyecto a un microcontrolador. En la figura 3.5 se observa el acondicionamiento del sensor el cual cuenta con filtros pasa bajos a la salida de cada uno de los ejes del acelerómetro, esto con el fin de retirar el ruido que pueda generar la salida del sensor ya que la señal generada por el acelerómetro corresponde a un nivel DC que varía de acuerdo al movimiento del sensor. Los filtros son externos al sensor por lo cual pueden variar de acuerdo a la aplicación que se le de al sensor, en el caso del proyecto los filtros son igual a como se observan en la figura.

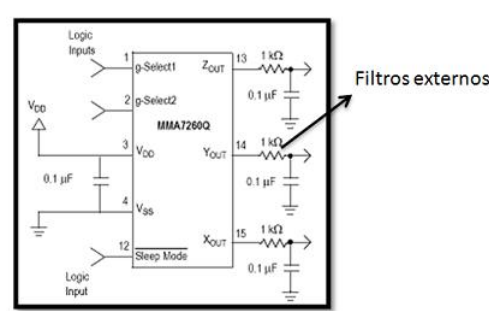


Figura 3.5: Diagrama de acondicionamiento del sensor, tomada del datasheet de la tarjeta MMA7260Q

La tarjeta MMA7260 funciona adecuadamente en el sistema de captura de movimiento ya que su tamaño es bastante pequeño y su acondicionamiento es

sencillo, esto permite mucha facilidad a la hora de ensamblar los sensores a la estructura. Para este sistema se propone realizar el sensado de las variables con 4 acelerómetros, es decir, 2 acelerómetros en cada pierna del exoesqueleto.

3.2. Software del microcontrolador PIC.

El microcontrolador del proyecto debe tener los siguientes requerimientos:

- 12 entradas análogas/digitales
- Módulo de transmisión serial
- Interrupciones por timer

Se propuso utilizar el microcontrolador (pic) de microchip 18f4550³ el cual cumple con los requerimientos necesarios para la ejecución del proyecto. Este PIC cuenta con 13 canales de conversión análoga-digital de 10 bits, el PIC también cuenta con un módulo de transmisión serial el cual será utilizado para la comunicación del microcontrolador con el computador.

Para poder realizar el proceso de muestreo de las señales que llegan de los acelerómetros es necesario utilizar las interrupciones del microcontrolador, las interrupciones son eventos que hacen que el microcontrolador deje de ejecutar tareas que están realizando en el momento para desarrollar dicho acontecimiento y luego regresar a las funciones que estaba realizando antes de que se presente la interrupción.

El microcontrolador 18f4550 consta con 21 fuentes de interrupciones las cuales se dividen en dos grupos los cuales se mostraran en el cuadro 3.1.

³Véase mas información en el anexo 1

Interrupción del temporizador 0
Interrupción por cambio en PORT B
Interrupción externa 0
Interrupción externa 1
Interrupción externa 2

(a) Grupo general de interrupciones

Interrupción del SSP	Interrupción por fallo del oscilador
Interrupción del A/D	Interrupción del comparador
Interrupción de recepción de la EUSART	Interrupción del USB
Interrupción de transmisión de la EUSART	Interrupción de escritura Flash/EEPROM
Interrupción del MSSP	Interrupción de colisión del bus (MSSP)
Interrupción del CCP1	Interrupción del detección de anomalías en V_{DD}
Interrupción del temporizador 2	Interrupción del temporizador 3
Interrupción del temporizador 1	Interrupción del CCP2

(b) Grupo de interrupciones de periféricos

Cuadro 3.1: Interrupciones del PIC 18f4550, tomado del manual PIC 18f4550 de la Universidad Politécnica de Valencia

Para el manejo de las interrupciones del 18f4550 hay que tener en cuenta que las interrupciones disponen de dos niveles de prioridad alto y bajo, todas las interrupciones pueden ser programadas en alguno de los dos niveles de prioridad, excepto la interrupción externa 0 la cual permanece siempre en alto, además de eso todas las interrupciones cuentan con 3 bits de configuración.

Para poder lograr las muestras de las señales es necesario utilizar la interrupción por timer, para el caso del proyecto se utiliza el TIMER0 y para poder determinar el tiempo de desborde la interrupción se utiliza el software Red Pic Calculator el cual permite calcular el tiempo de desborde de la interrupción teniendo parámetros como la frecuencia del cristal, el número de bits del registro del timer y la prescala que se desea a utilizar.

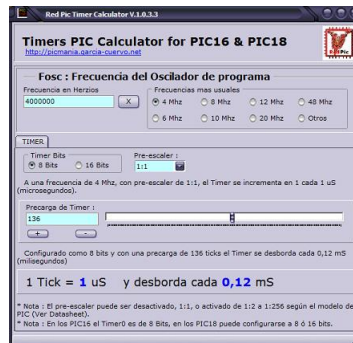


Figura 3.6: Software Red Pic Calculator

En la figura 3.6 se puede observar cómo se calcula el valor del timer para un determinado tiempo, en el ejemplo se utiliza un cristal de 4MHz, se configura el TIMER0 a 8 bits y un Pre-escalar 1:1, el tiempo que se desea para el desborde de la interrupción es de 0,12 ms y con las configuraciones anteriores el software genera un valor de 136 para cargar un valor del timer en el microcontrolador. Para verificar el funcionamiento de las interrupciones se realizaron diferentes pruebas, esto con el fin de garantizar el periodo de muestreo de las señales generadas por los acelerómetros, estas pruebas son mencionadas a continuación.

La primera etapa de desarrollo era lograr activar la interrupción del PIC para encender un led cada vez que a interrupción se desbordaba, para esto se elige un tiempo de 30ms el cual es suficiente para lograr la captura y el envío de las 12 señales generadas por los acelerómetros, así mismo se calcula el valor con el que se debe cargar la interrupción en el PIC mediante el software Red Pic Calculator.

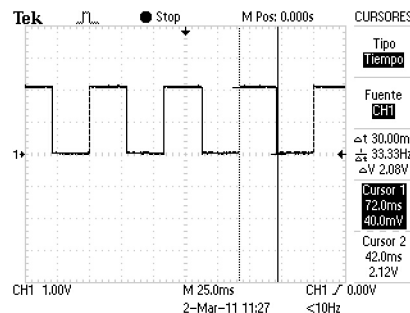


Figura 3.7: Señal de la interrupción del PIC vista en el osciloscopio

En la figura 3.7 se observa la señal que genera la interrupción del PIC, mediante esta señal y a ese determinado tiempo se enciende y se apaga un led cada vez que la interrupción se desborde, esto se puede observar en la figura 3.8

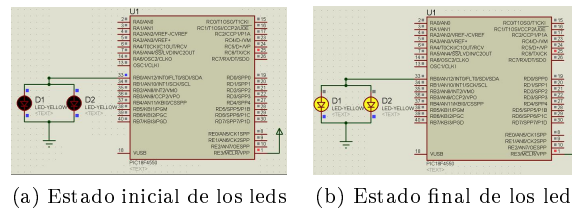


Figura 3.8: Cambio de estado de los leds mediante la interrupción del PIC

Luego de verificar mediante la prueba anterior que la interrupción se desborda en el tiempo indicado y que funciona adecuadamente se procede a realizar la segunda prueba, la cual consiste en agregar la conversión análoga-digital para que suceda lo mismo que en la prueba anterior.

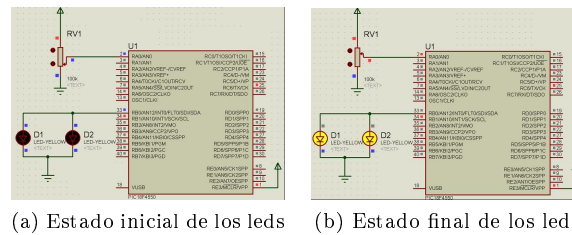


Figura 3.9: Cambio de estado de los leds mediante conversión A/D

Como se observa en la figura3.9 el estado del led cambia a medida que el valor del potenciómetro varía, este tipo de prueba se realizo para lograr verificar que la conversión análoga-digital funcione correctamente dentro de la interrupción⁴.

La última prueba que se realizo fue realizar la transmisión de los datos mediante el puerto serial del PIC, esta prueba consiste en envía el dato que se encuentra en el convertor análogo-digital por el puerto serie mediante RS-232.

⁴Para la simulacion se utiliza el software ISIS Proteus 7.2 Sp 6

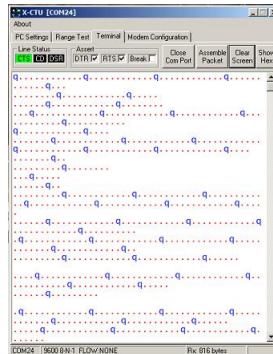


Figura 3.10: Transmisión de los datos mediante puerto serial.

En la figura 3.10 se observa la letra q la cual le ordena al microcontrolador que realice el envío de los datos además se observa una trama de puntos que corresponden a los 12 datos que el microcontrolador debe enviar al computador.

Una vez garantizado el periodo de muestreo de las señales de los acelerómetros, se procede a utilizar dos microcontroladores, es decir se utilizara un microcontrolador por cada dos sensores, para la comunicación entre los PICS se hará mediante I2C.

El protocolo I2C se desarrollo para simplificar la interconexión de dispositivos al microprocesador, Philips desarrolló un sencillo bus bidireccional basado en dos hilos por el que se trasmiten los datos vía serie, este bus de comunicación maneja una velocidad de 100Kbit/s en el modo estándar, aunque también permite velocidades de 3.4 Mbit/s

El I2C es un bus muy usado en la industria, principalmente para comunicar microcontroladores y sus periféricos en sistemas integrados (Embedded Systems) y generalizando más para comunicar circuitos integrados entre sí que normalmente residen en un mismo circuito impreso. La principal característica de I2C es que utiliza dos líneas para transmitir la información, una para los datos (SDA) y por otra la señal de reloj (SCL). También es necesaria una tercera línea(GND), pero esta sólo es la referencia, en aplicaciones como la de este proyecto donde se involucran microcontroladores la tercera línea no es necesaria en la comunicación.[13] En la siguiente figura se observa la conexión del protocolo I2C con su hilo de datos y el hilo de la señal de reloj.

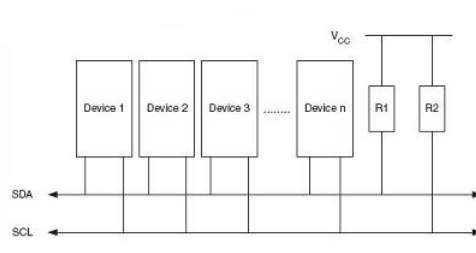


Figura 3.11: Conexión del bus I2C

La primera propuesta de diseño para el sistema de captura de movimiento corresponde al uso de dos microcontroladores para las 12 señales de los acelerómetros y se realiza una comunicación I2C entre los microcontroladores, en la siguiente figura se mostrara un pequeño diagrama en bloques de la propuesta de diseño del sistema.



Figura 3.12: Sistema de captura de movimiento utilizando comunicación I2C

En la figura 3.12 se observa la implementación del sistema de captura de movimiento utilizando como el I2C como protocolo de comunicación entre los dos PIC, este tipo de implementación cuenta con un PIC “Maestro” el cual será el encargado de recibir los datos de un PIC “Esclavo”, además de eso el maestro será el encargado de enviar todos los datos al computador mediante su puerto serial. El diseño de la figura 3.11 se trabajo hasta el punto donde debería realizarse la comunicación I2C entre el PIC “Maestro” y el PIC “Esclavo”.

La implementación no tuvo gran éxito ya que se presento un problema fundamental el cual consistía en la sincronización de los datos entre el PIC “Maestro” y el computador, adicionalmente el problema de sincronización también se presentaba en el envío de datos del PIC “Esclavo” al PIC “Maestro”.

Debido al problema del diseño anterior se estudio la posibilidad de utilizar un solo PIC el cual será el encargado de recibir las 12 señales de los acelerómetros y posteriormente enviar los datos mediante su puerto serial.



Figura 3.13: Sistema de captura de movimiento

En la figura 3.13 se observa el diseño final del sistema, el cual es el indicado ya que simplemente se utiliza un solo microcontrolador, esta implementación funciona correctamente por lo cual se procedió a realizar el diseño del circuito impreso del sistema, del diseño de la figura 3.13 se realiza el circuito impreso el cual consta de los acondicionamientos de los cuatro acelerómetros y el microcontrolador PIC⁵. En la siguiente figura se observa el diagrama de flujo correspondiente al software del microcontrolador PIC.

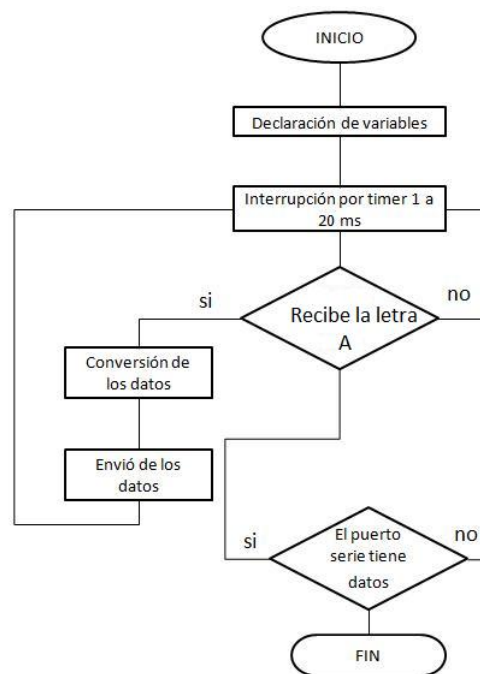


Figura 3.14: Diagrama de flujo del software del PIC

En la figura 3.14 se observa el diagrama del programa del PIC, este consta de la declaración de las variables, en la interrupción el programa realiza las labores de conversión y envío de los datos, adicionalmente a eso se genera una interrupción del puerto serie que verifica si el buffer del puerto está lleno, si

⁵Los planos del circuito impreso véase en el anexo 3

el buffer del puerto serie no recibe ningún dato no se realiza el proceso de la interrupción.

3.3. Módulo de comunicación.

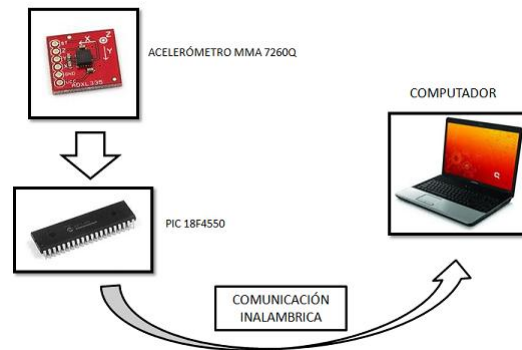


Figura 3.15: Elementos del sistema de captura de movimiento

En la figura 3.15 se observan los diferentes elementos del sistema, en este punto del proyecto ya se tienen los acelerómetros conectados con el microcontrolador PIC, ahora este se necesita comunicar con el computador.

La comunicación inalámbrica debe cumplir con los siguientes requerimientos.

- Voltaje de polarización entre 3.3 y 5 voltios
- Facilidad de conexión con el microcontrolador y el computador
- Confiabilidad a la hora de realizar la transmisión de datos

Debido a su facilidad de manejo, su confiabilidad, su alcance y demás características se escoge el módulo XBEE el cual está diseñado para facilitar la conexión del microcontrolador con el computador. El Xbee es módulo de radio frecuencia que trabajan en la banda de 2.4GHz con protocolo de comunicación 802.15.4 fabricados por MAXSTREAM. [4, 12]⁶

El protocolo de comunicación IEEE 802.15.4 (Zigbee) es un estándar que define el nivel físico y el control de acceso al medio de redes inalámbricas de área personal con tasas bajas de transmisión de datos (low-rate wireless personal area network, LR-WPAN). La actual revisión del estándar se aprobó en 2006, el grupo

⁶Para mas información véase en el anexo 2

de trabajo IEEE 802.15 es el responsable de su desarrollo.[14]La figura 3.16 corresponde a los 4 componentes del sistema que se mencionan en los bloques de la figura 3.1

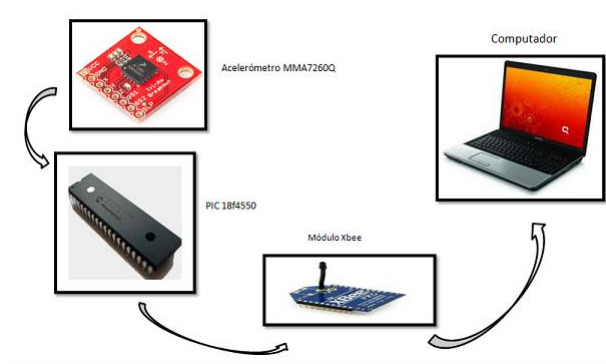


Figura 3.16: Sistema de captura de movimiento

3.4. Verificación de los datos en el computador.

Esta sección trata de la llegada de los datos al computador, en este punto del proyecto es muy importante saber si la llegada de los datos del microcontrolador al computador es correcta o no, para esto se realizo una prueba simple el cual permitía hacer la verificación de los datos que llegan del PIC al computador.

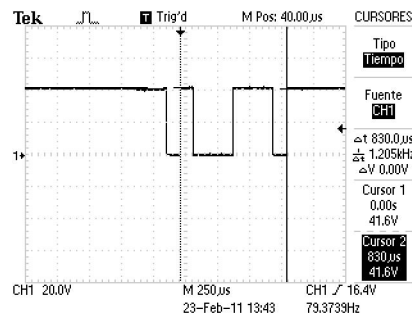


Figura 3.17: Señal correspondiente a la letra q vista en el osciloscopio

En la figura 3.17 se observa la señal obtenida de un osciloscopio de la letra q. La prueba consistía en enviar del microcontrolador la letra q al computador y visualizarla en el osciloscopio, se verifico que la señal de la figura fuera exactamente la letra q, pues en binario la letra q corresponde a 0111 0001 para poder leer la gráfica y relacionarla con el numero binario se debe leer el numero binario de derecha a izquierda y en la figura se lee de izquierda a derecha.

Una vez que se verifico la llegada correcta de los datos al computador, ahora se procede a verificar que la conversión y el envío de los datos por parte del PIC al computador sea correcta.

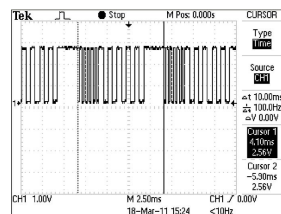
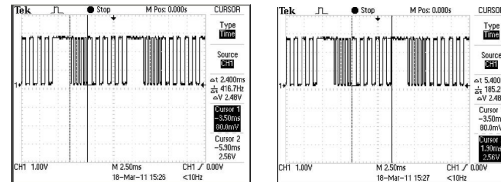


Figura 3.18: Señal de conversión y envío vista en el osciloscopio

En la figura 3.18 se observa la señal del un pin del microcontrolador, para esto se utiliza la función toggle del ccs para observar el cambio de estado del pin del PIC, el toggle se utilizo con el fin de medir el tiempo en que el microcontrolador gastaba realizando el proceso de conversión y envío de los datos por el puerto serial del PIC, la sección de la gráfica con mayor frecuencia corresponde a la

conversión de los datos capturados por los acelerómetros, en la figura 3.19a se puede ver el tiempo de conversión de los 12 datos entregados por los sensores, mientras que la sección con una frecuencia mayor corresponde al envío de los datos al computador con una velocidad de 57600 baudios la gráfica de la figura 3.19b muestra el tiempo y la frecuencia de envío de los datos, en la gráfica 3.18 se puede observar el periodo y la frecuencia de muestreo del sistema.



(a) Señal del ciclo de conversión vista en el osciloscopio

(b) Señal del ciclo de envío de datos vista en el osciloscopio

Figura 3.19: Señal del proceso de conversión y envío vista en el osciloscopio

Luego se realiza visualización de los datos, para esto se utiliza el software Matlab, el cual permite habilitar el puerto serie para recibir los datos que llegan del microcontrolador mediante el módulo Xbee. En la siguiente figura se observa el diagrama de flujo del software que se implementó en Matlab.

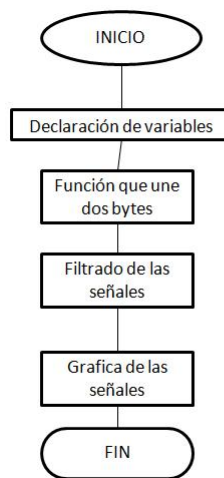


Figura 3.20: Diagrama de flujo del software de Matlab

En la figura 3.20 se observa el diagrama del software que se implementó en Matlab para la recepción de datos por parte del computador, este programa simplemente realiza el proceso de toma de datos, luego este realiza una función

la cual uno dos bytes que se envían para formar un dato de 10 bits el cual corresponde a la revolución del conversor A/D del PIC, luego de esto el software realiza el filtrado de las señales mediante un filtro digital fir y por ultimo el programa realiza las diferentes grafías de las señales.

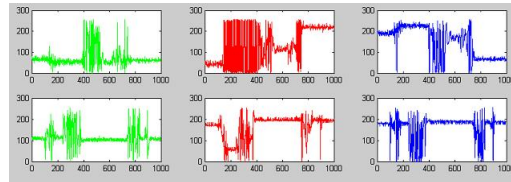


Figura 3.21: Señal de dos acelerómetros en Matlab

En la figura 3.21 se pueden observar las diferentes señales generadas por un acelerómetro en cada uno de sus ejes, Matlab guarda los datos en un arreglo el cual su longitud varía de acuerdo al número de ciclos que se le coloque en el software del computador.

Con la llegada de los datos en el computador ya se tiene el sistema de captura de movimiento, ahora el siguiente paso es realizar diferentes tipos de prueba de todo el sistema para mirar su funcionamiento y obtener los resultados del sistema.

Capítulo 4

Pruebas y resultados del sistema

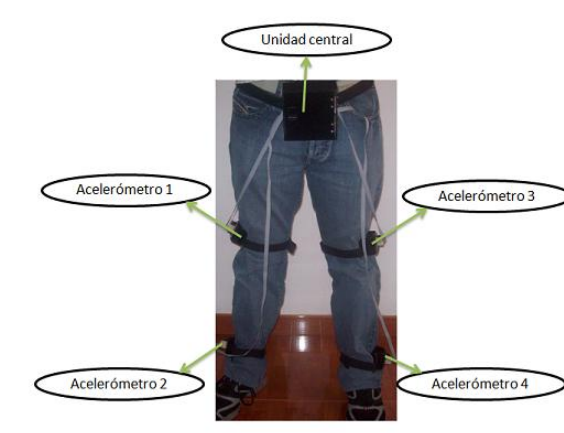


Figura 4.1: Sistema real de captura de movimiento

La figura 4.1 corresponde al sistema real de captura de movimiento, en las imágenes se puede observar las diferentes ubicaciones de los acelerómetros en las piernas de la persona y donde está ubicada la unidad de acondicionamiento y procesamiento de los datos.

Los acelerómetros se encuentran fijados a los miembros inferiores de la persona mediante una cinta velcro la cual permite que el sensor no se desplace por la pierna a la hora que se realiza algún movimiento. Los acelerómetros se encuentran ubicados en posiciones específicas en cada una de las piernas, esto

permite tener facilidad a la hora de realizar algún tratamiento de los datos en el computador.

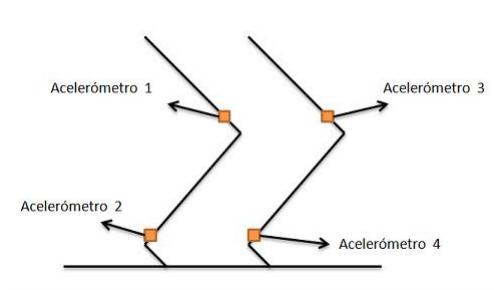


Figura 4.2: Posición de los acelerómetros

La figura 4.2 se observa la posición de los acelerómetros en los miembros inferiores, los sensores 1 y 3 se encuentran 7cm arriba de la rotula de la rodilla, específicamente se encuentran ubicados en el muslo, los sensores 2 y 4 están ubicados en la parte inferior de la tibia aproximadamente unos 4 cm arriba del maléolo externo.

Una vez obtenidas las posiciones exactas de los acelerómetros se procede a realizar la ubicación de los ejes coordenados de los sensores (x,y,z), la figura 4.3 muestra la ubicación de cada uno de los ejes coordenados correspondientes a los 4 sensores utilizados para el sistema.

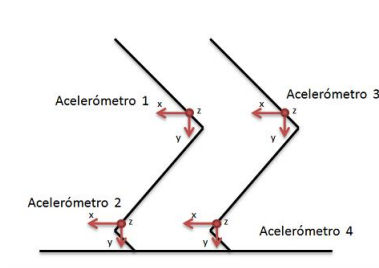


Figura 4.3: Ubicación de los ejes coordenados para cada acelerómetro

Una vez ubicados los acelerómetros y los ejes coordenados se procede a realizar las diferentes pruebas para la medición del tiempo en que el PIC envía los datos al computador.

El desarrollo de las pruebas del sistema corresponde a calcular el tiempo en que el sistema se demora realizando todo el proceso, desde la captura de las variables de los acelerómetros hasta el envío y la visualización de los datos en Matlab.

Para calcular el tiempo en que se demora el computador en recibir los datos se utiliza la función tic-toc de Matlab, esta función calcula un valor de tiempo aproximado en que el software se demora en recibir y graficar los datos entregados por los acelerómetros.

# DE MUESTRAS	TIEMPO (s)
100	1.745
200	2.454
300	3.457
400	4.409
500	5.442
600	6.469
700	7.426
800	8.455
900	9.463
1000	10.452

Cuadro 4.1: Numero de muestras y tiempo de captura sin graficar

En el cuadro 4.1 se observa el número de muestras capturadas y el tiempo aproximado en que los datos son enviados desde el PIC hasta el computador.



Figura 4.4: # muestras vs tiempo

La figura 4.4 muestra la gráfica correspondiente a los datos de la tabla 4.1, el comportamiento de la gráfica es lineal, ya que a medida que aumenta el número de muestras también aumenta de manera proporcional el tiempo de captura en el computador.

Una vez que se realizaron las pruebas para los cálculos del tiempo se procede a visualizar las 12 señales que genera el sistema de captura de movimiento en el proceso de la marcha de una persona.

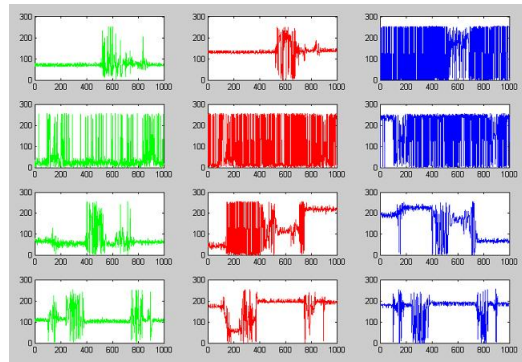
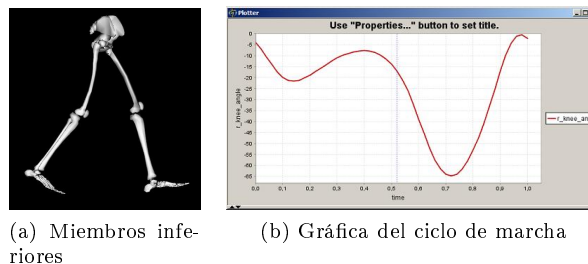


Figura 4.5: Señales correspondientes a los 4 acelerómetros del sistema

En la figura 4.5 se observan las señales correspondientes a cada uno de los ejes de los acelerómetros que componen el sistema, las graficas de color verde corresponden a las señales generadas por el eje X de cada uno de los acelerómetro, las graficas de color rojo corresponden a las señales del eje Y y las graficas de color azul corresponden a las señales del eje Z.

Para determinar el periodo y la frecuencia de muestreo indicado para el sistema se toma como referencia el ciclo de marcha del software Opensim, este software permite generar las curvas del ciclo de marcha de una persona.

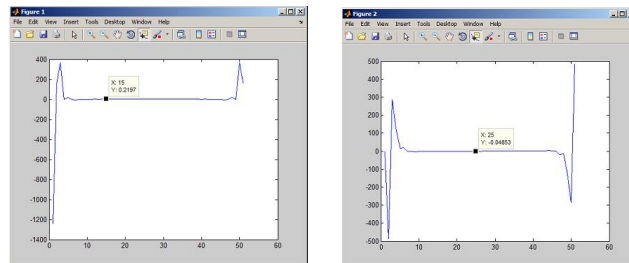


(a) Miembros inferiores

(b) Gráfica del ciclo de marcha

Figura 4.6: Ciclo de marcha de los miembros inferiores

La figura 4.6 muestra la gráfica del ciclo de marcha generado por el Opensim, la gráfica tiene un tiempo de muestreo de 20ms por lo cual genera 50 muestras en 1s que dura dicho ciclo, los datos de la gráfica son extraídos a matlab para realizar la FFT (Discrete Fourier Transform) y de allí determinar la frecuencia y el periodo de muestreo de la marcha.



(a) Parte real de la FFT de la gráfica

(b) Parte imaginaria de la FFT de la gráfica

Figura 4.7: FFT de la gráfica 4.6b


En la figura 4.7 se observa la FFT de la gráfica 4.6b, con esto se puede determinar el ancho de banda indicado para realizar el muestreo de forma adecuada para el sistema de captura de movimiento que se está realizando. En la gráfica 4.7a se observa la parte real de la FFT de allí se determina la frecuencia de corte(ω_c) que es de 15Hz, por lo cual para el sistema es conveniente muestrear a 2 veces la frecuencia de corte(ω_c), es decir mayor a 30Hz o a $30 \frac{m}{s}$ (muestras/segundo), el sistema de captura de movimiento está tomando $50 \frac{m}{s}$ (muestras/segundo) por lo que se considera un sistema de adquisición apropiado.

Capítulo 5

Conclusiones y trabajos futuros

- Para realizar la medición de las variables de la marcha de una persona por medio de los acelerómetros se desarrollo el hardware del sistema de captura de movimiento. Para que el sistema funcione adecuadamente se realizo el acondicionamiento de los acelerómetros el cual consiste en filtros pasa-bajos como se observa en la figura 3.5, esto permite que las señales lleguen de forma adecuada al microcontrolador para que puedan ser muestreadas y así estas se envíen mediante el protocolo Zigbee al computador. Al finalizar el proyecto se logro implementar un sistema de adquisición de datos para registrar las variables durante la marcha.
- Al finalizar el desarrollo del proyecto de investigación se llega a la conclusión que el sistema de captura se comporta como un sistema de tiempo real blando debido a que se presenta un retardo mínimo en la respuesta del sistema. El retardo en la respuesta se puede observar en la tabla 4.1 ya que para 100 muestras el sistema ideal se debe tomar un tiempo de 1s, pero el sistema real toma un tiempo de 1.754s por lo cual se presenta un retardo de 0.75s. Se desea que en un futuro se trabaje para lograr disminuir el retardo en la adquisición de los datos por parte del computador, por ejemplo se puede trabajar con un sistema operativo de tiempo real para lograr un sistema en tiempo real duro, .
- En el desarrollo del proyecto se presento el problema de la pérdida de datos a la hora de enviarlos del microcontrolador al computador, la pérdida de datos se presentaba al inicio de la comunicación por lo que las tramas iniciales de datos se perdían. Para minimizar el problema de la perdida de información se realiza una bandera que verifica que el dato de la primera posición del buffer de transmisión sea igual al dato de la posición del buffer de recepción, con esto reduce la perdida de datos únicamente al dar inicio al sistema de captura. Para lograr eliminar el problema de la perdida de datos se puede trabajar diferentes herramientas de desarrollo como por ejemplo C#, Java,etc.

Anexo 1 (PIC 18F4550).



MICROCHIP PIC18F2455/2550/4455/4550

28/40/44-Pin High-Performance, Enhanced Flash USB Microcontrollers with nanoWatt Technology

Universal Serial Bus Features:

- USB V2.0 Compliant
- Low Speed (1.5 Mb/s) and Full Speed (12 Mb/s)
- Supports Control, Interrupt, Isochronous and Bulk Transfers
- Supports up to 32 endpoints (16 bidirectional)
- 1-Kbyte dual access RAM for USB
- On-chip USB transceiver with on-chip voltage regulator
- Interface for off-chip USB transceiver
- Streaming Parallel Port (SPP) for USB streaming transfers (42/44-pin devices only)

Power-Managed Modes:

- Run: CPU on, peripherals on
- Idle: CPU off, peripherals on
- Sleep: CPU off, peripherals off
- Idle mode currents down to 5.8 µA typical
- Sleep mode currents down to 0.1 µA typical
- Timer1 oscillator: 1.1 µA typical, 32 kHz, 2V
- Watchdog Timer: 2.1 µA typical
- Two-Speed Oscillator Start-up

Flexible Oscillator Structure:

- Four Crystal modes including High Precision PLL for USB
- Two External Clock modes, up to 48 MHz
- Internal oscillator block:
 - 8 user-selectable frequencies, from 31 kHz to 8 MHz
 - User-tunable to compensate for frequency drift
- Secondary oscillator using Timer1 @ 32 kHz
- Dual oscillator options allow microcontroller and USB module to run at different clock speeds
- Fail-Safe Clock Monitor
 - Allows for safe shutdown if any clock stops

Peripheral Highlights:

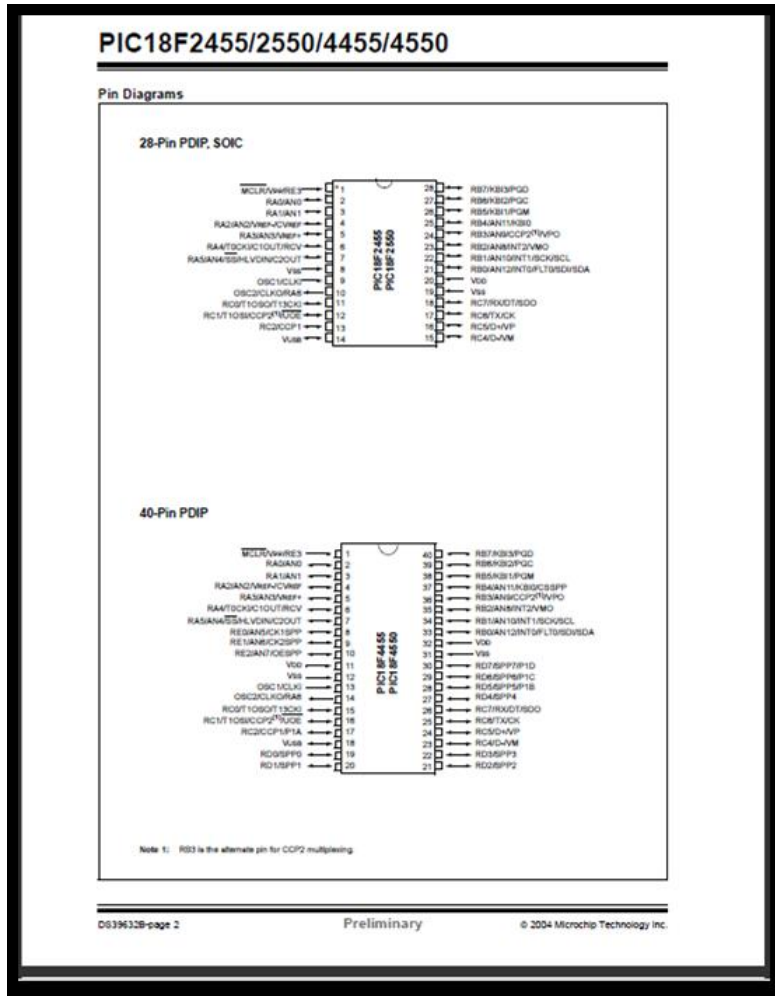
- High-current sink/source 25 mA/25 mA
- Three external interrupts
- Four Timer modules (Timer0 to Timer3)
- Up to 2 Capture/Compare/PWM (CCP) modules:
 - Capture is 16-bit, max. resolution 6.25 ns (T_{OV}/16)
 - Compare is 16-bit, max. resolution 100 ns (T_{OV})
 - PWM output: PWM resolution is 1 to 10-bit
- Enhanced Capture/Compare/PWM (ECCP) module:
 - Multiple output modes
 - Selectable polarity
 - Programmable dead time
 - Auto-Shutdown and Auto-Restart
- Enhanced USART module:
 - LIN bus support
- Master Synchronous Serial Port (MSSP) module supporting 3-wire SPI™ (all 4 modes) and I²C™ Master and Slave modes
- 10-bit, up to 13-channels Analog-to-Digital Converter module (A/D) with programmable acquisition time
- Dual analog comparators with input multiplexing

Special Microcontroller Features:

- C compiler optimized architecture with optional extended instruction set
- 100,000 erase/write cycle Enhanced Flash program memory typical
- 1,000,000 erase/write cycle Data EEPROM memory typical
- Flash Data EEPROM Retention: > 40 years
- Self-programmable under software control
- Priority levels for interrupts
- 8 x 8 Single-Cycle Hardware Multiplier
- Extended Watchdog Timer (WDT):
 - Programmable period from 41 ms to 131s
- Programmable Code Protection
- Single-Supply 5V In-Circuit Serial Programming™ (ICSP™) via two pins
- In-Circuit Debug (ICD) via two pins
- Optional dedicated ICD/ICSP port (44-pin devices only)
- Wide operating voltage range (2.0V to 5.5V)

Device	Program Memory		Data Memory		IO	10-bit A/D (ch)	CCP/ECCP (PWM)	SPP	MSSP		USART	Comparators	Timers 8/16-bit
	Flash (Bytes)	# Single-Word Instructions	SRAM (Bytes)	EEPROM (Bytes)					SPI™	Master I ² C™			
PIC18F2455	24K	12288	2048	256	24	10	2/0	No	Y	Y	1	2	1/3
PIC18F2550	32K	16384	2048	256	24	10	2/0	No	Y	Y	1	2	1/3
PIC18F4455	24K	12288	2048	256	35	13	1/1	Yes	Y	Y	1	2	1/3
PIC18F4550	32K	16384	2048	256	35	13	1/1	Yes	Y	Y	1	2	1/3

© 2004 Microchip Technology Inc.
Preliminary
DS39632B-page 1




Anexo 2 (Módulo Xbee).


Product Datasheet

XBee® ZigBee®/Mesh RF Modules

Embedded RF Modules for OEMs



Providing critical end-point connectivity to Digi's Drop-in Networking product family, XBee ZigBee/Mesh RF modules are low-cost and easy to deploy.



Features/Benefits

- ZigBee/mesh and proprietary peer-to-peer mesh topologies
- 2.4 GHz for worldwide deployment
- Fully interoperable with other Digi Drop-in Networking products, including gateways, device adapters and extenders
- Common Xbee footprint for a variety of RF modules
- Low-power sleep modes
- Multiple antenna options
- Industrial temperature rating (-40° C to 85° C)
- Low-power and long-range variants available


Overview

XBee Product Family
The XBee family of embedded RF modules provides OEMs with a common footprint shared by multiple platforms, including multipoint and ZigBee/mesh topologies, and both 2.4 GHz and 900 MHz solutions. OEMs deploying the XBee can substitute one XBee for another, depending upon dynamic application needs, with minimal development, reduced risk and shorter time-to-market.

Why XBee ZigBee/Mesh RF Modules?
For applications where robust mesh networking topologies are preferred, XBee ZigBee/mesh OEM RF modules provide developers with both ZigBee mesh and the non-to-be-released proprietary DigiMesh™ topologies. These networks allow devices to harness the entire network of RF modules to effectively extend range beyond that of a single module, and create a more stable and reliable network. Employing dynamic self-healing, self-discovery functionality for reliable communications, XBee ZigBee/mesh OEM RF modules make mesh networking simple and easy to deploy.

Drop-in Networking End-Point Connectivity
XBee OEM RF modules are part of Digi's Drop-in Networking family of end-to-end connectivity solutions. By seamlessly interfacing with compatible gateways, device adapters and extenders, the XBee embedded RF modules provide developers with true beyond-the-horizon connectivity.

www.digi.com



Platform	XBee® ZNet 2.5 (Series 2)	XBee-PRO® ZNet 2.5 (Series 2)
Performance		
RF Data Rate	250 kbps	250 kbps
Indoor/Urban Range	133 ft (40 m)	300 ft (100 m)
Outdoor/RF Line-of-Sight Range	400 ft (120 m)	1 mi (1.6 km)
Transmit Power	1.25 mW (+1 dBm) / 2 mW (+3 dBm) boost mode	50 mW (+17 dBm) / 125 mW (+20 dBm)
Receiver Sensitivity (1% PER)	-97 dBm (-48 dBm boost mode)	-102 dBm
Features		
Serial Data Interface	3.3V CHDS UART	3.3V CHDS UART
Configuration Method	API or AT Commands, local or over-the-air	API or AT Commands, local or over-the-air
Frequency Band	2.4 GHz	2.4 GHz
Interference Immunity	DSSS (Direct Sequence Spread Spectrum)	DSSS (Direct Sequence Spread Spectrum)
Serial Data Rate	1200 bps - 1 Mbps	1200 bps - 1 Mbps
ADC Inputs	(4) 10-bit ADC inputs	(4) 10-bit ADC inputs
Digital I/O	10	10
Antenna Options	Chip, Wire Whip, U.F.L., RP-SMA	Chip, Wire Whip, U.F.L., & RP-SMA
Networking & Security		
Encryption	128-bit AES	128-bit AES
Reliable Packet Delivery	Retries/Acknowledgments	Retries/Acknowledgments
IDs and Channels	PAN ID, 64-bit IEEE MAC, 16 Channels	PAN ID, 64-bit IEEE MAC, 13 Channels
Power Requirements		
Supply Voltage	2.1 - 3.6VDC	3.0 - 3.6VDC
Transmit Current	35 mA / 45 mA boost mode @ 3.3VDC	295 mA @ 3.3VDC
Receive Current	38 mA / 40 mA boost mode @ 3.3VDC	45 mA @ 3.3VDC
Power-Down Current	<1 uA @ 25° C	<1 uA @ 25° C
Regulatory Approvals		
FCC (USA)	Yes	Yes
IC (Canada)	Yes	Yes
ETSI (Europe)	Yes	Yes (Dist. Units Only)
C-TICK (Australia)	Yes	Pending
Telex (Japan)	Yes	Pending (Dist. Units Only)

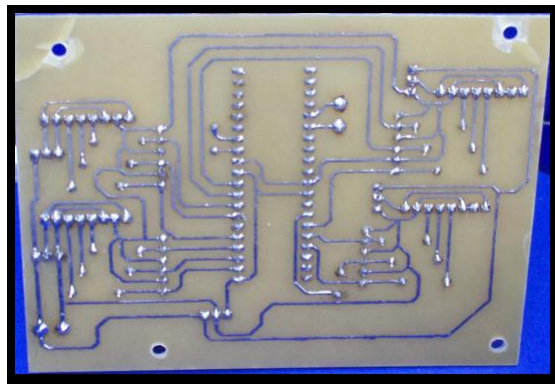
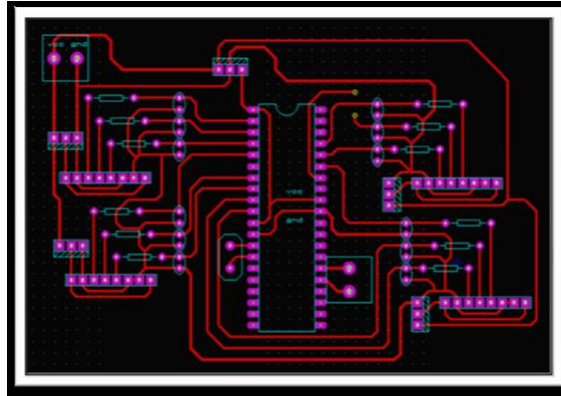
ZigBee - mesh

(100 MHz)

(100 MHz)

Please visit www.digi.com for part numbers.

Anexo 3(Diseño del circuito impreso).



Bibliografía

- [1] Alfredo. Un exoesqueleto para parapléjicos, Marzo 2008.
- [2] Eduardo Garcia Berijo. *Compilador C CCS y simulador Proteus para Microcontroladores PIC*. Marcombo S.A., 2008.
- [3] Alicia Calderón. Comienza la producción del exoesqueleto hal, el traje robótico que incrementa tu fuerza 10 veces, Abril 2009.
- [4] DEC electronics. Modulos de rf zigbee bidireccionales (transceivers).
- [5] Gerardo Gabriel Gómez Añazco Federico Augusto Gaona Verón. Captura de movimientos, métodos y aplicaciones diversas. *Facultad Politécnica, Universidad Nacional de Asunción - Paraguay*, 1:6.
- [6] Lihua Huang y Ryan Steger H. Kazerooni, Jean-Louis Racine. On the control of the berkeley lower extremity exoskeleton (bleex). *University of California, Berkeley, International Conference on Robotics and Automation, Barcelona, España*, 1:8, 2005.
- [7] JJcorps. Problems with i2c in pic16f877a, Mayo 2006.
- [8] López Guel Juan. Sistemas de tiempo real, Julio 2006.
- [9] Ariel A. Bonardi y Gerardo G. Gentiletti Marcela V. Urdaniz, María A. Ortiz. Diseño y simulación de una Órtesis robótica para rehabilitación de la marcha. *Cátedra de Robótica, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Entre Ríos*, 1:4.
- [10] Objetivos. Sistemas de tiempo real.
- [11] José de Jesús Medel Juárez y Asdrúbal López Chau Pedro Guevara López. Importancia de los sistemas de tiempo real.
- [12] Sebest. Configuración módulos xbee, Diciembre 2009.
- [13] Wikipedia. I2c, Noviembre 2010.
- [14] Wikipedia. Ieee 802.15.4, Febrero 2011.
- [15] Wikipedia. Sistema de tiempo real, Marzo 2011.

- [16] J. Grosso y D. Tibaduiza. Diseño y validación de un exoesqueleto maestro-esclavo para rehabilitación de piernas. *UNAB - Ingeniería Mecatrónica.*, 1:6, 2008.
- [17] J.M. Grosso y D. Tibaduiza. Diseño conceptual de un exoesqueleto para asistir la rehabilitación de miembro inferior. *Universidad Autónoma de Bucaramanga (Colombia)*, 1:6, 2009.
- [18] FRANCISCO JAVIER ATAPUMA YANEZ. Diseño y construcción de un prototipo usando un acelerómetro tridimensional para la determinación de movimientos en un vehículo. *ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL DE QUITO*, 1:30, 2009.