



MEDICIÓN DE ÁNGULOS CON TECNOLOGÍA ZIG-BEE ORIENTADO A UN SERVICIO DE REHABILITACIÓN BIOMECÁNICA DEL CODO

Autores:

CELSO ANDRÉS FORERO FLÓREZ CÓDIGO: 2011192
JOHN CHRISTIAN BATISTA ÁLVAREZ CÓDIGO: 2010763

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER

Facultad de Ingenierías Físico Mecánicas

Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones

Grupo de Investigación RadioGis

Bucaramanga

2007



MEDICIÓN DE ÁNGULOS CON TECNOLOGÍA ZIG-BEE ORIENTADO A UN SERVICIO DE REHABILITACIÓN BIOMECÁNICA DEL CODO

Proyecto de grado presentado como requisito parcial para optar al título de
Ingeniero Electrónico

Autores:

CELSO ANDRÉS FORERO FLÓREZ CÓDIGO: 2011192
JOHN CHRISTIAN BATISTA ÁLVAREZ CÓDIGO: 2010763

Director:

Ph.D. HOMERO ORTEGA BOADA

Codirector:

M.Sc. JOSE DE JESUS RUGELES

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER

Facultad de Ingenierías Físico Mecánicas

Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones

Bucaramanga

2007

DEDICATORIA

Le dedico a Dios a mi madre a mi
padre, a mi hermano y a mi
hermosa hija. Ustedes me brindan
la fuerza que llevo por dentro.
Gracias

JOHN C. BATISTA ALVAREZ

DEDICATORIA

A Dios padre creador quien ilumina mi existir

A la memoria de mi Madre Lucía,
modelo ejemplar de amor y vida, tu
energía y sabiduría vivirán por siempre
para guiar mi camino.

A mi Padre Celso Forero, por su amor,
dedicación y esfuerzo para formarme
como persona y profesional.

A mi hermana Carmen Lucía, mujer de
grandes cualidades y virtudes, de quien
he recibido apoyo constante y con quien
he compartido agradables momentos.

A mis hermanos Miguel Angel,
Javier y Octavio, por su respaldo,
alegrías y ejemplo para mi vida.

CELSO ANDRÉS FORERO FLÓREZ

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a todos los profesores que a lo largo de nuestra carrera de Ingeniería Electrónica nos han transmitido su conocimiento y enseñanzas de vida para ser mejores personas y prepararnos en la misión de construir un mejor futuro para la humanidad.

En especial agradecemos al Profesor Homero por creer en nuestro trabajo y por brindarnos todas las herramientas necesarias para que se hiciera realidad este proyecto.

Agradecemos la colaboración de la Doctora Fisioterapeuta Carmen Lucía Forero, por su valioso aporte para impulsar la herramienta desarrollada como aplicación al área de rehabilitación.

Agradecemos a nuestro equipo de trabajo conformado por el Doctor Ortopedista Celso Pedraza, Dr. Omar Cháves y Marisol Julieth Vanegas, por ser de gran apoyo en la realización de este gran proyecto.

Tabla de Contenido

Tabla de Contenido	i
RESUMEN	v
ABSTRACT	vi
Introducción.....	vii
Capítulo 1.....	2
1.1 Aplicaciones en la medicina.....	2
1.1.1 El codo y su rehabilitación.....	4
Generalidades de procedimiento	6
Utilidad y ventajas que presenta el dispositivo durante las sesiones de rehabilitación	8
1.2 Aplicaciones en la industria.....	9
1.3 Otras aplicaciones.....	9
Capítulo 2.....	11
Métodos utilizados para la medición de ángulo.....	11
2.1 Goniómetro.....	11
2.1.2 Flex sensor.....	12
2.1.3. Giroscopio.....	14
2.4 Sextante.....	15
2.5 Acelerómetro como herramienta para medir ángulo.....	17
2.5.1 Tipos de acelerómetros.....	18
2.5.2 Parámetros de un acelerómetro.....	20
2.5.3 Acelerómetros y medición Angular.....	22
Capítulo 3.....	28
Sensores inalámbricos.....	28
3.1 Generalidades de una Red de Sensores Inalámbrica.....	29
3.2 Tecnología Zigbee.....	30
3.2.1 IEEE 802.15.4.....	31
3.2.2 Topologías de Red [29].....	32

3.2.3 Zigbee Alliance	33
3.2.4 Mercados y aplicaciones Zigbee	34
3.2.5 Objetivos Técnicos del Mercado Zigbee	35
Capitulo 4.....	37
Kit de desarrollo Sun Spot.....	37
Configuración	37
4.1 Estación base	38
4.2 Spot –Nodo sensor.....	38
4.2.1 Procesador Principal	39
4.2.2 La Memoria	41
4.2.3 Memoria Flash.....	41
4.2.4 La Batería	42
4.2.5 Circuito de Control de Potencia	43
4.2.6 Radio Inalámbrico.....	45
4.2.7 La Antena	46
4.2.8 Tarjeta Impresa de Sensores	47
4.2.9 Conversor Análogo a Digital.....	49
4.2.10 El Acelerómetro	50
Capitulo5.....	54
Descripción de la herramienta de Software.....	54
5.1 Lenguaje de programación Java	55
5.1.1 Java 2 Standard Edition (J2SE)	56
5.1.2 Java 2 Enterprise Edition (J2EE).....	56
5.1.3 Java 2 Micro Edition (J2ME).....	57
5.2 Entorno de Desarrollo.....	58
5.3 Software de adquisición y procesamiento	61
5.3.1 Programación del Spot	61
5.3.2 Programación ejecutada por el computador	64
Capítulo 6.....	68
Pruebas y resultados	68
6.1 Pruebas.....	70
6.2 Análisis de los resultados.....	75

Conclusiones.....	77
Recomendaciones	78
Bibliografía	79

Lista de Figuras

1.1 Movimiento flexión-extensión del brazo.....	3
1.2 Movimiento supinación-pronación del brazo	3
1.3 Conformación del codo. Húmero, radio y cubito	5
1.4 Paciente en recuperación	7
1.5 Control del brazo de una máquina en un entorno industrial.....	9
1.6 Brazo de un robot con sus respectivas coordenadas y giros.....	10
2.1 Goniómetro.....	12
2.2 Flex sensor.....	13
2.3 Diseño del circuito para implementar el Flex Sensor.....	13
2.4 Giróscopos	15
2.5 Toma de Ángulo con el Sextante.....	16
2.6 Sextante Mecánico.....	16
2.7 Sistema masa resorte.....	18
2.8 Ubicación de los Acelerómetros.....	23
2.9 Diagrama vectorial de aceleración.....	24
3.1 Arquitectura de una Red Inalámbrica de Sensores.....	29
3.2 Topologías de una Red Zigbee	32
4.1 Configuración de la Tarjeta Principal de un SPOT.....	39
4.2 Pines del conector periférico de la Tarjeta Auxiliar.....	40
4.3 Tarjeta de Sensores de un SPOT.....	48
4.4 Esquema de la Tarjeta de Sensores de un SPOT.....	48
4.5 Entradas y Salidas de la Tarjeta de Sensores.....	49
4.6 Direcciones de los ejes x,y,z del Acelerómetro.....	50
5.1 Estructura de la Plataforma Java.....	55
5.2 Plataforma Java y Ediciones según su uso.....	57
5.3 Ventana Inicial de Netbeans IDE.....	59
5.4 Ventana para abrir Proyectos.....	59
5.5 Cargar el Programa al SPOT.....	60
5.6 Ejecutar el Programa.....	60
5.7 Diagrama de flujo programación de los Spot.....	61

5.8 Diagrama de flujo programa ejecutado en el computador.....	64
5.9 Interfaz Grafica para presentar el Ángulo.....	67
6.1 Comparación Goniómetro- SPOTs.....	68
6.2 Ejemplo de Movimiento y ubicación de los Sensores.....	70
6.3 Sesión de ejercicios	72
6.4 Registro del Brazo lesionado del Paciente A	73
6.5 Registro del Brazo sano del Paciente A	73
6.6 Registro del Brazo lesionado del Paciente B	74
6.7 Registro del Brazo sano del Paciente B	74

Lista de Tablas

2.1 Resultado de ejemplos usando la ecuación angular.....	27
4.1 Tiempo de vida de la carga de la batería.....	42
4.2 Consumo de potencia para una unidad SPOT.....	44
4.3 Rangos de Tensión para diferentes Sectores de SPOT.....	45
4.4.Asignación de Canal de la Antena....	46
4.5 Ajustes para la Potencia de Salida mediante PA_LEVEL.....	47
4.6 Rango de Voltajes Asignados Para cada Eje del Acelerómetro.....	52
4.7 Características del acelerómetro LIS3L02AQ3	52
4.8 Características eléctricas del acelerómetro LIS3L02AQ3	53
6.1 Comparación Goniómetro SPOTs.....	69
6.2 Comparación de Resultados.....	76

RESUMEN

TÍTULO: MEDICIÓN DE ÁNGULOS CON TECNOLOGÍA ZIG-BEE ORIENTADO A UN SERVICIO DE REHABILITACIÓN BIOMECÁNICA DEL CODO *

AUTORES: BATISTA ÀLVAREZ JOHN CHRISTIAN
FORERO FLÒREZ CELSO ANDRÈS**

PALABRAS CLAVES: Ángulo, Acelerómetro, Articulación, Java, Rehabilitación, Sun Spot Zigbee.

DESCRIPCIÓN:

En este trabajo de grado se desarrolla una aplicación, de dispositivos inalámbricos con sensores, para análisis de movimiento durante los ejercicios de rehabilitación en la articulación del codo. El sistema transmite con tecnología de comunicación Zigbee en sus capas Física y MAC.

La herramienta desarrollada permite obtener medición de ángulo en base a las aceleraciones censadas con dos acelerómetros que se relacionan para adquirir medidas de arco de movimiento en pacientes con limitaciones en la flexión y extensión de la articulación del codo. Esta herramienta pretende ser una ayuda para los fisioterapeutas ya que ofrece una interfaz gráfica que muestra en tiempo real el ángulo de forma continua.

Con esta solución se podrá llevar un registro de las limitaciones y el progreso del paciente, permitiendo libertad en los ejercicios del paciente, reduciendo el temor de dolor y proporcionando ergonomía, dicho sistema reemplaza el goniómetro de regleta y elimina las dificultades de medición. Para este trabajo se realizó un software en lenguaje de programación Java mediante el entorno de desarrollo NetBeans.

Con este proyecto se pretende dar un paso relevante para el gran proyecto del grupo de investigación RadioGis sobre el desarrollo de servicios de telecomunicaciones convergentes en Colombia, adquiriendo la experiencia y tecnologías apropiadas.

* Proyecto de Grado

** Facultad de ciencias Físico Mecánicas. Escuela de Ingenierías Eléctrica Electrónica y Telecomunicaciones.
Homero Ortega Boada

ABSTRACT

TITLE: ANGLE MEASUREMENT WITH ZIG-BEE TECHNOLOGY AS A SERVICE FOR ELBOW BIOMECHANICAL REHABILITATION*

AUTHORS: BATISTA ÀLVAREZ JOHN CHRISTIAN
FORERO FLÒREZ CELSO ANDRÈS**

INDEX TERMS: Angle measurement, goniometry, Accelerometer, Joint, elbow, Rehabilitation, Sun Spot, ZigBee.

DESCRIPTION

In this work, a wireless sensors device application for joint movement tracking and for elbow rehabilitation exercises analysis has been developed. This system is based on Zigbee technology, over its MAC layer, a kind of sensor networks for wireless communicating accelerometers used for angle measument.

The developed tool allows getting angle measures from two accelerometers, carefully ubicated in the limb of interest, for sensing arc movement on patients with flexion and extension limitation. This tool is intended to help physiotherapists on providing a graphic interface for real time and continuously registering angle. With this solution, doctors can keep a records about patient's limitation and improvement. It is a wearable wireless solution that gives freedom to patients during training exercises, reducing pain fear and giving ergonomic sensation. It can be considered the next generation of goniometry and, opposed to rule goniometers, it avoids measure troubles. In this work a software design in Java language was made for making it possible to obtain sensed values, trasltaing then to angle units and visualizing them, taking in account many limiting factors as undesidered joint movements. The interface development environment NetBeans was used.

This project pretends to bee an outstanding step for intentions of the Research and Developmet Group - RadioGis on visioning future telecommunication services over convergent networks.

* Degree Project

** Physical Mechanics Faculty. Electrical, Electronical and Telecommunications School. Homero Ortega Boada

Introducción

En el creciente y agitado mundo en que vivimos donde la tecnología avanza a pasos agigantados y la globalización se hace cada vez más fehaciente, los sistemas de comunicación juegan un papel protagónico donde la distancia ya no puede ser un problema. Adicional a esto, el hombre ha logrado verdaderamente obtener provecho de esta rama, conjugando las telecomunicaciones con cientos de aplicaciones y haciéndonos la vida cada vez más sencilla. El presente trabajo de grado tiene una visión que va más allá de la rehabilitación del codo, de la rodilla o cualquier articulación, ya que es fácilmente aplicable a diversos entornos. Al fusionar el ambiente y procedimientos médicos con las bondades de las comunicaciones inalámbricas, se pretende crear una herramienta para los profesionales en salud ofreciéndoles un método con nuevas técnicas que les facilitará y optimizará su trabajo.

La visión que se tiene es poder integrar mediante una tecnología nueva y creciente de transmisión inalámbrica, llamada **ZigBee**, toda una clase de servicios médicos que sean fácilmente controlados por computadora. A su vez, la red inalámbrica **ZigBee** hará parte de un proyecto basado en el desarrollo de servicios con redes convergentes, el cual, actualmente es llevado a cabo por el grupo de investigación RadioGIS y tiene como uno de los objetivos futuro brindar un servicio de telemedicina.

Enmarcado en este entorno, el presente trabajo está encaminado hacia la medición y lectura en tiempo real del arco de movimiento, realizado por el codo, mediante el uso de sensores inalámbricos que transmitirán los datos a un PC donde serán visualizados.

Además de ser inalámbrico este sistema es portátil lo que lo convierte en una gran ayuda a la hora de seguir una terapia desde el consultorio del profesional o desde la misma casa del paciente en rehabilitación. El registro de dicho ángulo será de gran importancia en la rehabilitación de pacientes con lesiones en codo ya que nos mostrará el progreso del paciente a través del tiempo.

El presente libro, comenzará entonces con una ilustración de la utilidad y beneficio que ofrece el trabajo desarrollado. Adicionalmente se mencionarán otras aplicaciones que ofrece un sistema de medición de ángulo en diferentes áreas laborales.

Para tener una idea de los diversos dispositivos existentes que permiten medir directamente la magnitud angular, se incluye en el capítulo 2, una descripción de estos instrumentos que han sido utilizados durante años, tanto aquellos inventados hace ya varios siglos como también los actuales mecanismos desarrollados para este fin. En seguida de esto, se presenta el método que se implementó en este trabajo y describe la transformación matemática que permite medir ángulo a partir de un sensor que no fue creado para este fin pero que sus datos de aceleración que registra sirven para extraer el valor angular buscado. Por lo tanto en este capítulo se describirá en detalle las características del acelerómetro.

Como parte de la visión global que encierra este proyecto, en el capítulo 3 se realiza una presentación teórica sobre las redes *ZigBee*, las ventajas de esta tecnología y las formas topológicas en las que se puede configurar la red.

El capítulo 4, uno de los capítulos más importantes, presenta la descripción en detalle de los diferentes integrados y elementos electrónicos que componen cada dispositivo con los que se trabajó, fabricados por el laboratorio de investigación de la compañía Sun Microsystems, aquí se detallan las características de elementos como el radio, la batería, el micro procesador, memoria, el conversor análogo – digital y como elemento principal el acelerómetro, así también se describe el comportamiento en cuanto al consumo de potencia, capacidad y funciones de cada integrado.

Para hacer posible el desarrollo de la solución y la implementación de los dispositivos, fue necesario e indispensable la utilización de un lenguaje de programación de alto nivel, versátil, bien estructurado y compatible con los recursos hardware, es por esto que se recurrió al lenguaje Java para toda la programación del software, de la interfaz gráfica y

del hardware, haciendo uso de sus herramientas como las librerías y la máquina virtual. En el capítulo 5 se hace entonces una descripción de esta herramienta de programación.

Finalmente se continúa con los capítulos donde se describen las pruebas al sistema, en un ambiente propio de la aplicación, así mismo, los resultados y su análisis. Y por último se exponen las conclusiones.

Capítulo 1

Medición de ángulos y sus aplicaciones

Es incontable el número de aplicaciones que se pueden obtener de una buena medición de ángulo y precisamente esta premisa fue la inspiración del presente trabajo. Cuando se presentó la posibilidad de crear un método portátil e inalámbrico para ayudar al profesional del área de salud en el tratamiento a pacientes en rehabilitación, se pensó en el codo, ya que en niños y adolescentes es una de las articulaciones que más sufre lesiones, y se concluyó que si se monitorea de forma dinámica al paciente durante las actividades programadas por el profesional para el tratamiento de su lesión, se mejorará el proceso de rehabilitación y se optimiza el servicio prestado por la entidad de salud y por el equipo responsable.

1.1 Aplicaciones en la medicina

El cuerpo humano tiene numerosas articulaciones, las cuales se pueden agrupar según su función y anatomía, en este trabajo se pretende dar una aplicación al sistema de medición angular para analizar y caracterizar el movimiento de la articulación del codo.

Biomecánica del Codo

De forma simplificada, el codo es una bisagra con un simple movimiento de flexión – extensión (figura 1.1). Adicionalmente se pueden realizar movimientos de supinación y pronación que consisten en girar el radio alrededor del cúbito (figura 1.2).

La flexión y extensión es un movimiento humero radial y tiene un arco de movimiento cercano a los 140° como lo muestra la figura 1.2. Es precisamente este arco de movimiento articular (AMA) el que es tenido en cuenta en el presente trabajo.

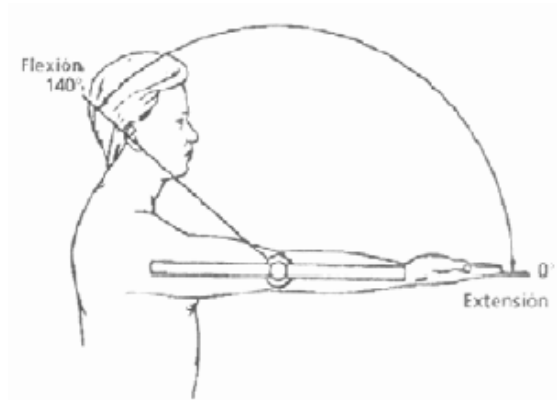


Figura 1.1: Movimiento flexión-extensión del brazo

(Fuente: José M^a Pérez-Benavides y Pérez. "La valoración del daño corporal en la articulación del codo".)

El movimiento supinación y pronación se debe hacer con el codo flexionado 90° y adosado al cuerpo para no confundir este movimiento con la rotación del hombro. El arco de movimiento es de aproximadamente 160° como lo muestra la figura 1.3.

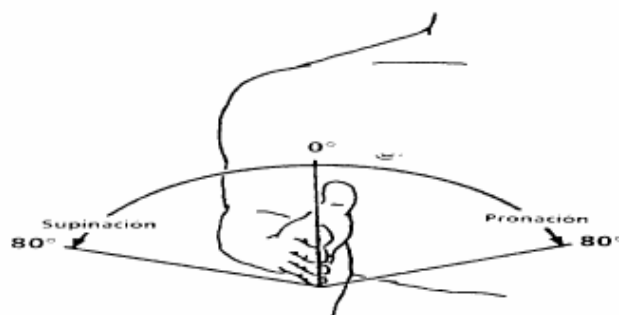


Figura 1.2: Movimiento supinación-pronación del brazo

(Fuente: José M^a Pérez-Benavides y Pérez. "La valoración del daño corporal en la articulación del codo".)

Cabe aclarar sin embargo que dichos arcos de movimientos varían de persona a persona.

1.1.1 El codo y su rehabilitación

El codo es la articulación intermedia encargada de realizar la unión mecánica del miembro superior. Se ubica en esta extremidad superior entre el primer segmento, llamado brazo, y el segundo segmento denominado antebrazo.

La extremidad superior del cuerpo está formada por tres huesos, el Húmero, el Cúbito y el Radio (Figura 1.3). El codo es una articulación de tipo tróclea, es decir, que es en forma de polea y permite que un par de huesos adyacentes puedan girar en un mismo plano, en este caso, el extremo del Cúbito se articula a modo de gancho óseo en una cavidad denominada fosa olecraneana del húmero, estableciendo así el movimiento de flexión y extensión.

La biomecánica de las articulaciones y en general de todo el sistema músculo-esquelético es usada para evaluar la integridad de todo el conjunto motor de un ser vivo. Se sabe, por estudios realizados a través de la historia y estandarización de valores, cuáles son las medidas adecuadas o los valores cinemáticos esperados para cada persona, dependiendo de la clasificación según su sexo, altura y longitud de la extremidad. En este caso el codo tiene un rango de movimiento en un solo plano de flexión y de extensión, recorriendo un desplazamiento angular máximo de 140° aproximadamente (Figura 1.1). Cuando ocurre una lesión, se alteran estos valores que caracterizan el movimiento y la persona queda limitada en su acción articular, así necesite o no cirugía, el siguiente paso es la rehabilitación, la cual es evaluada, durante el proceso de la terapia requerida se analiza qué tanto estos valores se normalizan, es decir, se debe determinar cuánto a recuperado la calidad de movimiento. La ventaja de contar con un dispositivo automático, portátil e inalámbrico, es que el profesional, e inclusive el mismo paciente, pueden apreciar mediante una gráfica, la mejoría en tiempo real mientras se realizan los ejercicios terapéuticos, además se podrá monitorizar la relación óptima de los esquemas de ejercicios, esto se traducirá en menor tiempo para obtener resultados de la rehabilitación y optimización del trabajo del fisioterapeuta. Hay que tener en cuenta que para la rehabilitación de articulación se programan metas semanales, donde no alcanzarlas puede ser tan perjudicial como sobrepasarlas, por esta razón, es tan necesario conocer de

manera dinámica el progreso y desempeño del paciente, más aún que el mismo paciente conozca su estado actual en caso de realizar ejercicios en su propio hogar.

En la figura 1.3 se muestra la articulación del codo formada en el brazo por el humero el radio y el cubito como.

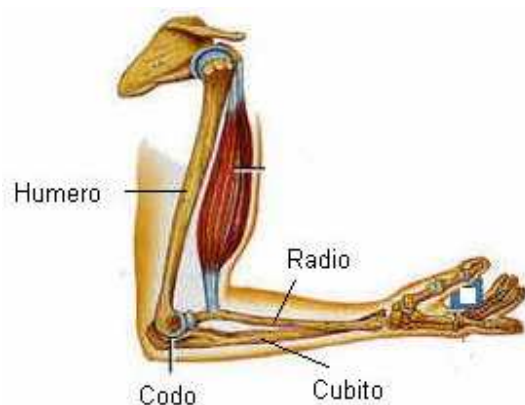


Figura 1.3: conformación del codo. Humero, radio y cubito
(Tomado de. Antoniazzi, Luis D. *Variables Biomecánicas*. PubliCE Standard.)

La contusión más simple de cualquier articulación lleva en sí el enorme riesgo de una rigidez incapacitante, si el tratamiento no es correcto. Con frecuencia, muchas de estas lesiones traumáticas, leves en apariencia, son tratadas por personas no calificadas y sin educación formal en salud, lo que conduce al empeoramiento de la lesión y a consecuencias graves. El tratamiento de las lesiones osteoarticulares consiste en la reducción y fijación estable de los fragmentos óseos e inmovilización de la articulación en forma perfecta durante el menor tiempo posible, después de asegurar la estabilidad de la articulación se procede a la rehabilitación que es diseñada por el profesional en salud especializado en esta rama con base a una evaluación minuciosa de la historia clínica del paciente, prestando mucha atención en la naturaleza de la lesión. Entonces desde la fase inicial de la rehabilitación, el sistema desarrollado muestra su primera utilidad, como ayuda al profesional brindándole la información necesaria para realizar la valoración del paciente, y planificar de forma óptima estrategias encaminadas a la rehabilitación. Durante los ejercicios programados entra de nuevo la utilidad del dispositivo, permitiendo la evaluación del progreso del paciente o de varios paciente de manera dinámica durante la

realización de las actividades formuladas, además permite monitorizar el exceso o la falta de esfuerzo, estas características son una gran ventaja teniendo en cuenta que esto es casi imposible de realizar por métodos convencionales.

Generalidades de procedimiento ^[18]

La primera etapa del proceso corresponde al periodo de inmovilización el cual dura aproximadamente 10 días, pero en algunos casos puede tardar un tiempo más, durante este periodo se pueden movilizar las articulaciones de las extremidades superiores como el hombro, la muñeca o la mano, pero nunca movilizar el codo, ni siquiera con la mejor osteosíntesis.

Después de los 10 días del periodo de inmovilización se comienza una etapa de movilización activa asistida, en pequeñas amplitudes para realizar prono-supinación y flexo-extensión.

Después de la inmovilización, a la tercera semana se realizan movimientos activos, es decir, ejecutados por el propio paciente sin necesidad de ayudas externas, primero se deben realizar estos movimientos sin elementos de resistencia en mano, muñeca, prono supinación y flexo extensión del codo.

A partir de la 6ª a la 8ª semana, se efectúa en el paciente la movilización activa con resistencia progresiva, ejercicios de tonificación y si hay déficit de movilidad se deben realizar movimientos de contracción y relajación.

Con base en lo anterior se aplican 4 tipos de protocolos a seguir dependiendo si hubo fisura con desplazamiento o sin desplazamiento, o si en cambio hubo fractura marginal con desplazamiento del fragmento o si ocurrió fractura conminuta.

Fisura sin desplazamiento: Se inmoviliza el miembro superior con un cabestrillo por 2 a 3 semanas permitiendo el movimiento de dedos, mano y hombro, el codo queda limitado en sus movimientos. Pasados 10 días aproximadamente, se le permite sacar el brazo del cabestrillo 3 a 4 veces al día y se le permite realizar ejercicios activos de flexión, extensión y prono supinación. En enfermos de los cuales se sospecha que no cumplirán las indicaciones, es preferible inmovilizar con yeso por 15 a 20 días, luego se le retira el yeso y se inmoviliza con un cabestrillo.

Fisura con desplazamiento: La recuperación completa dura 1 a 2 meses, mientras transcurre este plazo, se va autorizando mayor amplitud en los movimientos. Quedan formalmente prohibidos movimientos pasivos, es decir, aquellos en los cuales el paciente no realiza esfuerzo sino que es aplicado un mecanismo de fuerza externa, por lo tanto no se deben ejecutar extensiones y flexiones forzadas, deben ser libres, se deben suprimir los masajes y evitar cargar peso.

Fractura marginal con desplazamiento del fragmento: Se inmoviliza en cabestrillo o con férula de yeso por 3 semanas, iniciándose en forma precoz la rehabilitación de los movimientos articulares. También están prohibidos los ejercicios pasivos, masajes articulares, cargas de peso, etc.

Fractura conminuta: Se inmoviliza de 2 a 3 semanas con férula de yeso, y se permiten los movimientos activos tan pronto el proceso de cicatrización de la herida haya finalizado. De igual forma que el anterior, quedan prohibidos los masajes, movimientos pasivos y pesos colgantes. La recuperación completa logra obtenerse en 2 a 3 meses.



(a)



(b)

Figura 1.4: Paciente en recuperación (a) Con Férula de yeso (b) Paciente con Cabestrillo
(Fuente: Fisioterapeuta: Carmen Lucía Forero F. Paciente: Sandra Gladys Roa B.)

Utilidad y ventajas que presenta el dispositivo durante las sesiones de rehabilitación¹

Los grados de medición se harán con mayor exactitud y veracidad ya que no estaría influyendo el temor del paciente a que lo lleven a niveles dolorosos, sino que él mismo libremente estaría registrando su arco de movimiento y no se tendría la necesidad del contacto directo con el especialista para tomar las medidas.

Se puede utilizar el aparato como un **biofeedback** cuando por prescripción médica se ordena realizar la terapia con restricción de movimiento para no dañar estructuras que precozmente durante el tratamiento de rehabilitación no pueden ser sometidas a máximos arcos, ya sea de flexión o extensión, en tal caso se programará el aparato con una señal de alarma que avisará si el paciente sobrepasa dichos límites de movilidad.

De igual forma, el sistema permite demarcar el rango de movimiento donde no se manifiesta dolor, con el fin de que el paciente pueda iniciar los ejercicios de fortalecimiento en dicho rango.

En ocasiones se le dice al paciente que realice ejercicios interactivos tales como levantamiento de balón o trabajo con **Teraband**, donde puede ser monitorizado con el aparato durante esta actividad de movimientos libres y resistidos mientras se irá evaluando cómo mejora sus arcos y fluidez de movimiento. De esta forma se puede demostrar que el paciente progresa mejor cuando no está concentrado en la toma de medida por parte del terapeuta sino que se entretiene con los ejercicios.

¹ Colaboración de la fisioterapeuta Carmen Lucía Forero

1.2 Aplicaciones en la industria

La medición de ángulos se aplica en la industria debido a que muchos procesos dependen de una buena medición del ángulo. Recordando que el ángulo no es más que una medida de posición relativa, es de gran utilidad en maquinarias de todo tipo, siendo utilizada en procesos de alineación y posicionamiento. En diversas maquinarias el ángulo de elevación es vital ya que permite controlar una posición deseada como lo muestra la figura 1.5.

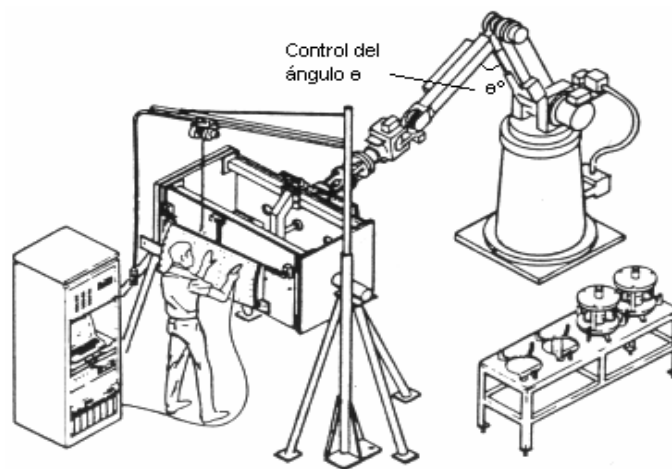


Figura 1.5: Control del brazo de una maquina en un entorno industrial
(Fuente: <http://www.depi.itcm.edu.mx/apacheco/expo/html/ai10/pix/dos.gif>)

1.3 Otras aplicaciones

La medición de ángulo encuentra también aplicación en campos como la robótica donde sensores angulares indican el movimiento del robot. Pueden indicar posición e inclinación dándole orientación a sus movimientos, siendo de vital importancia por ejemplo a la hora que el robot se levante cuando sufra una caída. En la figura 1.6 se observa el brazo de un robot donde q_1 y q_2 se refiere a los giros realizados por esta extremidad. Estos giros son medidas angulares. Estas medidas angulares son a su vez controladas por un

microprocesador el cual por medio de un programa basado en posición le dará órdenes en el sentido que debe moverse.

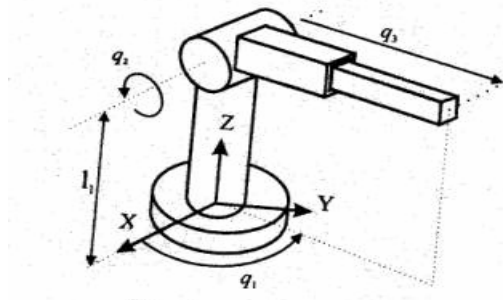


Figura 1.6: Brazo de un robot con sus respectivas coordenadas y giros.

(Fuente: <http://www.ind-controller.com/images/robot.gif>)

En el campo de la topografía la medición de inclinación también se hace importante la medición angular. Aquí se miden ángulos horizontales y verticales que se emplean para comparar las direcciones hacia dos o más puntos con sus respectivas inclinaciones. Se pueden medir ángulos mediante tránsito o teodolito y mediante cinta llamado el método de cuerda.

Estos son tan solo algunos ejemplos de la medición angular pero en realidad el campo de acción es limitado solo por la mente humana.

Capítulo 2

Métodos utilizados para la medición de ángulo

Durante la consulta realizada para el presente trabajo, se encontraron diversos instrumentos con los que especialistas en el área de la salud miden el ángulo durante las terapias físicas en extremidades. Entre estos, se encuentran herramientas rudimentarias que van desde una regleta o un goniómetro, hasta elementos más sofisticados como el **flex sensor**, e incluso han sido utilizados mecanismos de monitoreo por ondas electromagnéticas o de medición a partir de imágenes pregrabadas.

En éste capítulo se presenta una breve descripción de algunas de estas herramientas para medir ángulos, utilizadas en la biomecánica, en la industria, o en astronomía, entre otras áreas donde se requiere de un control o monitoreo de movimiento angular durante algún proceso.

El método que se empleó en este trabajo, para medir el ángulo en la articulación, se basa en la utilización de unos sensores que no registran directamente el valor del ángulo, sino que, censan aceleración y dependiendo de la forma en que estén ubicados, se puede obtener indirectamente el valor preciso del ángulo a través de la implementación de un algoritmo matemático. Al final del capítulo se explicará en detalle el proceso que se utilizó en esta tesis para la detección de dicho parámetro.

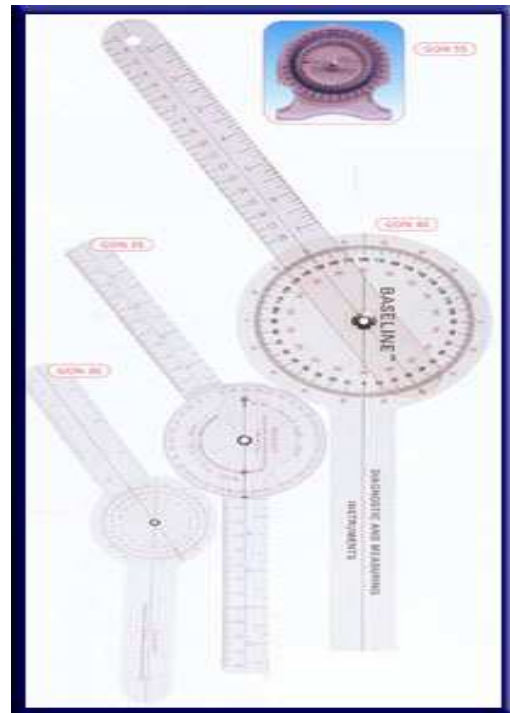
2.1 Goniómetro

El goniómetro tal como su nombre indica es un instrumento para medir ángulos. Consta básicamente de dos regletas las cuales se intersectan en un punto fijo giratorio el cual corresponde al punto central de un disco del mismo material en donde se encuentran las

marcas de ángulo, de esta forma se va rotando una de las regletas hasta quedar paralela al eje de medición y en este se observa el ángulo correspondiente en el círculo central. Existen goniómetros tanto análogos como versiones digitales, tal como se observan en las siguientes figuras.



(a)



(b)

Figura 2.1: Goniómetro:

(a) Mecánico digital (Fuente: http://www.psymtec.com/catalogo_rehabilitaci%F3n/ins_eva_mov.htm)

(b) Regleta Mecánica (Fuente: <http://www.tensmexico.com/goniometros.htm>)

2.1.2 Flex sensor

Es una tira de plástico flexible recubierta con tinta semiconductor. El mecanismo de funcionamiento es sencillo y está basado en variación de impedancia, se trata de una

resistencia variable o potenciómetro que incrementa o disminuye su valor según lo flexionemos más o menos. En reposo, es decir horizontal, generalmente posee una resistencia mínima de 10 K Ω , mientras que al doblarlo incrementa su valor, hasta llegar a 90° obteniendo una resistencia máxima de 40 K Ω . Es importante decir que este tipo de sensor solo tiene un sentido de funcionamiento con lo que si lo doblamos hacia el lado opuesto, la resistencia casi no varía. En la figura 2.2 se muestra un ejemplo de *flex sensor* típico junto con sus medidas. En figura 2.3 se observa un ejemplo de diseño de circuito para implementar el sensor, adicionalmente se muestra la ecuación que relaciona el voltaje de entrada con voltaje de salida, determinada por las resistencia de diseño y la resistencia variable del sensor.

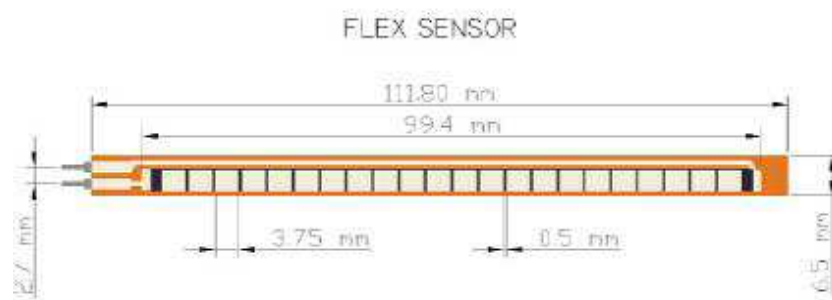


Figura 2.2: Flex sensor

(Fuente: <http://devices.sapp.org/component/flex/>)

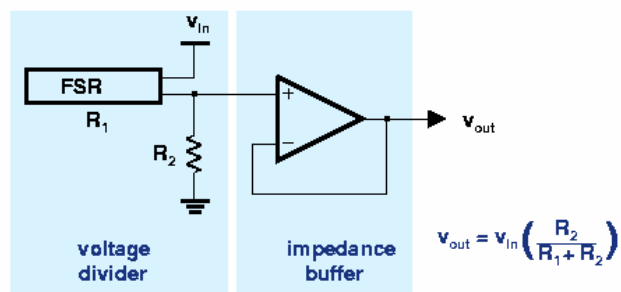
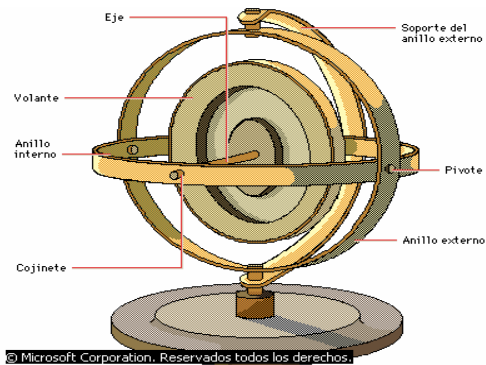


Figura 2.3: Diseño del circuito electrónico para implementar el flex sensor

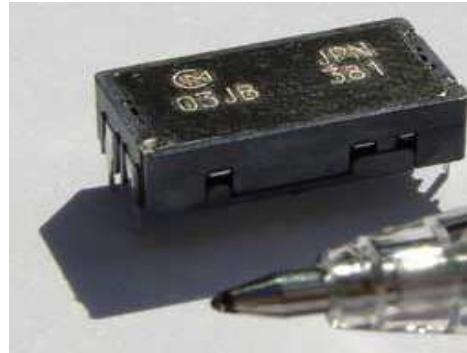
(Fuente: <http://devices.sapp.org/component/flex/>)

2.1.3. Giroscopio

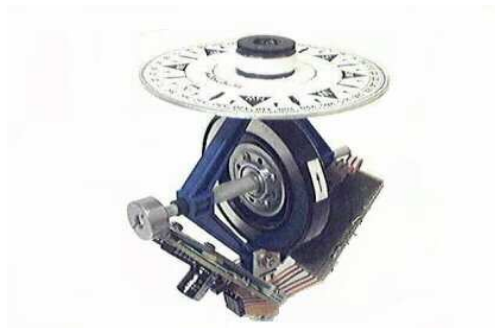
También llamado giróscopo, se le llama a cualquier cuerpo en rotación que presenta dos propiedades fundamentales: la primera es la inercia giroscópica o "rigidez en el espacio", la cual se fundamenta en el principio del **momentum** angular afirmando que la velocidad angular adquirida de un objeto permanecerá constante siempre y cuando ningún torque externo sea aplicado al objeto; y la segunda se denomina precesión, que es la inclinación del eje en ángulo recto ante cualquier fuerza que tienda a cambiar el plano de rotación. Estas propiedades son inherentes a todos los cuerpos en rotación, incluida la Tierra. El giroscopio tradicional es un dispositivo inercial-mecánico de forma esférica o que también se encuentran en forma de disco, montado en un soporte cardánico, de forma que pueda girar libremente en cualquier dirección; este instrumento se emplea para demostrar las propiedades anteriores o para indicar movimientos en el espacio. A veces se denomina giostato a un giróscopo que sólo se puede mover en torno a un eje de giro. A veces se añade el prefijo giro al nombre de la aplicación, por ejemplo, giroestabilizador o giropiloto. Así mismo, cumpliendo con un ciclo de evolución, se han desarrollado los giroscopios basados en silicio para reemplazar a sus predecesores mecánicos y voluminosos. Hay dos tipos populares de giroscopios electrónicos: el giróscopo resonador y el giróscopo óptico. Un giroscopio resonador electrónico contiene una masa del poli silicato resonando. Esta masa resuena con la velocidad suficiente para producir una fuerza de Coriolis cuando el dispositivo es sometido a rotación. Una estructura de sensor capacitivo que modula la fuerza de Coriolis es montada ortogonalmente a la masa. La fuerza de Coriolis es entonces directamente relacionada con la velocidad rotatoria, y el demodulador interior convierte la señal en voltaje de salida. Un giroscopio óptico opera según el principio del efecto de **Sagnac**. Este efecto puede observarse en un anillo óptico giratorio. Dos rayos de luz son propagados en el anillo, uno en sentido de las agujas del reloj y el otro en sentido contrario. Si el anillo se rota hacia algún ángulo determinado, los rayos viajarán distancias diferentes. Es posible determinar el ángulo en que el giroscopio se ha movido calculando la diferencia en distancia que la luz ha viajado.



(a)



(b)



(c)

Figura 2.4: (a) Giróscopo mecánico tradicional (Fuente: Microsoft Corporation, Encarta)
 b) Giróscopo electrónico integrado, tan pequeño como la punta de un bolígrafo
 (Fuente: www.gyroscope.com/d.asp?product=PIEZO)
 (c) Montaje de una aplicación con Giroscopio electrónico

2.4 Sextante

El sextante es un instrumento que permite medir ángulos entre dos objetos tales como dos puntos de una costa o un astro tradicionalmente, el Sol y el horizonte. Conociendo la elevación del Sol y la hora del día se puede determinar la latitud a la que se encuentra el observador. Esta determinación se efectúa con bastante precisión mediante cálculos matemáticos sencillos de aplicar.

El funcionamiento de este dispositivo se basa en la superposición de las imágenes de dos objetos cuya distancia se está midiendo. Esto se consigue mediante un sistema óptico que

consiste en un telescopio y dos espejos, uno fijo y otro móvil. En el diagrama que aparece a continuación, el telescopio T está montado en una posición fija en el soporte del instrumento, apuntando hacia el espejo A. La mitad superior de este espejo es transparente, la mitad inferior plateada. Un segundo espejo, el B, se coloca en ángulo sobre el espejo A. Un observador que mire a través del telescopio, hacia el horizonte H, ve este último a través de la porción transparente del espejo A y al mismo tiempo ve la imagen de la estrella o del sol S en la parte plateada del espejo A, como un reflejo del espejo B inferior. Al mover B, manipulando la palanca L, la imagen de la estrella se lleva hasta que coincide con la imagen del horizonte. La distancia angular entre la estrella y el horizonte puede entonces leerse en una escala grabada en el cuerpo del sextante. Esta escala es un arco de un sexto de círculo o 60° . Cada grado de la escala del sextante es equivalente a 2° de distancia angular entre los objetos que se observan, ya que la luz del Sol se refleja en dos espejos.

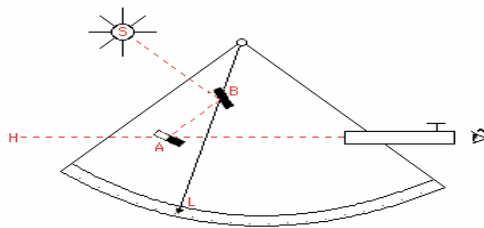


Figura 2.5: Ilustración de toma de ángulo con el sextante
(Fuente: Microsoft Corporation. Encarta)



Figura 2.6: Sextante mecánico
(Fuente: www.ua.es/personal/fernando.ballenilla/Estiba_mercancias.html)

2.5 Acelerómetro como herramienta para medir ángulo

La estrategia utilizada para la medición angular en este trabajo esta basada en acelerómetros. Antes de explicar el método se hará una introducción teórica de los acelerómetros para tener idea de sus características y su funcionamiento.

Principios básicos

El acelerómetro es un instrumento de medida que proporciona lecturas de la variación de la aceleración con respecto al tiempo. Los valores obtenidos se expresan en fuerza g (g es la aceleración de la gravedad, $9,8 \text{ m/s}^2$) por cada segundo.

Un acelerómetro puede construirse uniendo una masa m a un dinamómetro cuyo eje está en la misma dirección que la aceleración. Por la Ley Fundamental de la Dinámica o Segunda Ley de Newton, se sabe que:

$$\vec{F} = m\vec{a} \quad (2.1)$$

donde \vec{F} representa las fuerzas que actúan sobre la masa m y \vec{a} es la aceleración.

Dado que el dinamómetro indica la fuerza \vec{F} , y el valor de m es una característica del instrumento, se puede conocer el módulo de la aceleración \vec{a} :

$$a = F/m \quad (2.2)$$

La otra ley que interviene en los acelerómetros es la Ley de Hook $F = ky$. Combinando esta ley con la ecuación (2.1) obtenemos:

$$a = \frac{ky}{m} \quad (2.3)$$

La ecuación 2.3 se puede ver aplicada en la siguiente figura:

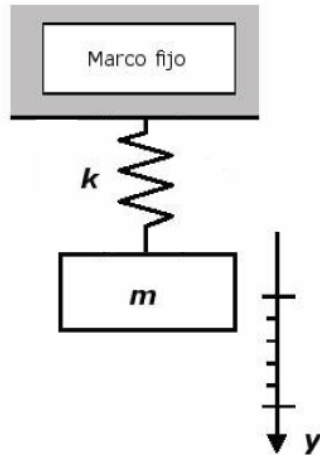


Figura 2.7: Sistema masa-resorte
(Fuente: Autor)

2.5.1 Tipos de acelerómetros

Un acelerómetro es básicamente un dispositivo que actúa como un transductor entre la aceleración mediada y su voltaje de salida. Según la dirección en la que miden la aceleración, los acelerómetros pueden ser:

- Uniaxiales o de un único eje.
- Biaxiales o de dos ejes.
- Triaxiales o de tres ejes.

Según la forma en que transforma dicha aceleración a voltaje se puede clasificar en: ^[5]

Acelerómetros piezoresistivos

Algunos materiales varían su resistencia eléctrica de manera considerable al sufrir deformaciones. Este fenómeno, conocido como efecto piezoresistivo, es la base para la construcción de las celdas de carga, y es aprovechado en este tipo de acelerómetros. Se emplean piezoresistores para transformar las variaciones de desplazamiento sufridas por la masa de prueba en una señal de tensión proporcional.

Acelerómetros piezoeléctricos

El efecto piezoeléctrico es un fenómeno que se produce en algunos cristales, en los que aparece una carga eléctrica en su superficie al ser sometidos a una deformación o que se deforman al ser sometidos a la presencia de un campo eléctrico. Los acelerómetros piezoeléctricos aprovechan este fenómeno, haciendo que la desviación de la masa comprima a un cristal, obteniéndose una tensión proporcional a la compresión y al desplazamiento de la masa.

Acelerómetros capacitivos

La capacitancia entre un par de placas paralelas depende del área y de la separación entre ellas. Si una serie de placas se acopla a los laterales de la masa de prueba, el desplazamiento de ésta provocará una variación de la capacitancia entre las placas, con lo que se podrá obtener una variación en la frecuencia de una señal eléctrica, variación que luego podrá transformarse en una señal de tensión. Esta es la clase de acelerómetros más utilizada por su gran relación eficacia costo.

2.5.2 Parámetros de un acelerómetro

A la hora de pensar en realizar una aplicación que involucra un acelerómetro es muy importante conocer los parámetros, ya que al tener claro esto se puede escoger el que más se adecua a las necesidades requeridas.

Rango Dinámico

Este parámetro mide las aceleraciones máxima y mínima que el dispositivo podrá detectar, viene dado en unidades de g, siendo g la aceleración debida a la gravedad.

Sensibilidad

Describe la ganancia del sensor, indicando cuánto cambia la salida por cada unidad de cambio en la aceleración de entrada, las unidades de este parámetro viene dado en mV/g para salida analógica. El valor de sensibilidad puede ser determinado aplicando 1g de aceleración a este, como el sensor puede medir aceleración constante, esta prueba es fácil de hacer simplemente apuntando el eje de interés hacia el centro de la tierra quedando paralelo al eje de gravedad y anotando el valor de salida, luego se rota el sensor 180 grados, quedando el eje en la misma dirección pero en sentido contrario y se registra de nuevo el valor de salida obtenido, de esta forma se logra aplicar al sensor +1g y -1g de aceleración. Tomando estas dos magnitudes, se procede a restar los dos valores y el resultado dividirlo en 2 para así obtener la sensibilidad real del sensor. Este valor cambia muy poco por variación de temperatura, así mismo es muy poco lo que varía este parámetro a través del tiempo.

La tolerancia de sensibilidad describe el rango de sensibilidades que se obtienen de una numerosa población de sensores dentro de una prueba estadística.

Salida a 0g

Es el valor de señal que se muestra a la salida en el instante en que no hay ningún tipo de aceleración actuando sobre el sensor. Para un acelerómetro tri-axial en estado estable sobre una superficie horizontal, si el eje 'Z' registra +1g, entonces medirá 0g en el eje 'X' y 0g en el eje 'Y', lo que corresponde a un valor de $V_{dd}/2$ [V], por ejemplo si el acelerómetro está alimentado con 3.3V entonces a la salida debe registrar idealmente 1650 mV para 0g de aceleración en el eje. Este valor de desviación ideal del nivel 0g es llamado en inglés **Zero-g offset**. En acelerómetros precisos, el *offset* es modificado como resultado de someterlo a intensivo estrés mecánico. El cambio de este parámetro es pequeño por variaciones de temperatura y es un valor muy estable a través del tiempo. La tolerancia de este parámetro es el rango de valores obtenidos de 'Salida a 0g' observados en un grupo numeroso de sensores.

Frecuencia de Resonancia

Su valor representa la relación existente entre la masa de prueba y la constante elástica de los resortes que componen el acelerómetro. Para que la lectura del acelerómetro sea correcta, la frecuencia de la aceleración soportada por el dispositivo debe ser varios órdenes de magnitud menor que este parámetro, por lo que hay que tenerlo presente cuando se va a trabajar con aceleraciones dinámicas.

Densidad Espectral de Ruido

Expresado en $\frac{\mu g}{\sqrt{Hz}}$, representa la potencia del ruido en la entrada del acelerómetro como una función del ancho de banda de la aplicación. Se utiliza para determinar el valor mínimo de la señal que podrá ser detectado dado un ancho de banda.

Impedancia de salida

Es la impedancia en la etapa de salida de cada canal del acelerómetro. La impedancia es parte de un filtro conformado por un condensador externo (de al menos 320 pF) y una resistencia interna. Gracias a que la impedancia de salida es alta, solo es necesario un condensador de bajo costo para ajustar la frecuencia de corte del filtro pasa bajos, además de que permite mejor interacción con el conversor A/D evitando errores de medición.

Auto prueba (Self Test)

Es una función que permite probar la parte eléctrica y mecánica del sensor. Cuando se aplica una señal digital al pin de entrada ST, se produce un cambio en la referencia interna para cierta área del sensor, y crea una deflexión definida en la estructura móvil. El sensor generará una señal definida y un chip de interfaz realizará el acondicionamiento de la señal.

Otros Parámetros

Los demás datos que se encuentran en una hoja de especificaciones están relacionados con características propias de cada modelo, como pueden ser el tipo de salida entregada (analógica, digital, PWM), los voltajes de operación, corrientes de alimentación y otros.

2.5.3 Acelerómetros y medición Angular

Utilizar acelerómetros para obtener medidas angulares es tan solo una aplicación de estos dispositivos. El método empleado en este proyecto está basado en la relación de los ejes de dos acelerómetros y se sustenta en los trabajos de investigación de *Kurata* y colaboradores [1]. La forma en que el método se aplica depende de los grados de libertad de la articulación. Puesto que en el presente trabajo la medición angular esta enfocada en el arco de movimiento de flexo extensión producido por el codo, se explicara la obtención del ángulo para articulaciones con un grado de libertad.

En la figura 2.8 se puede observar la forma en que deben ser ubicados los dos acelerómetros.

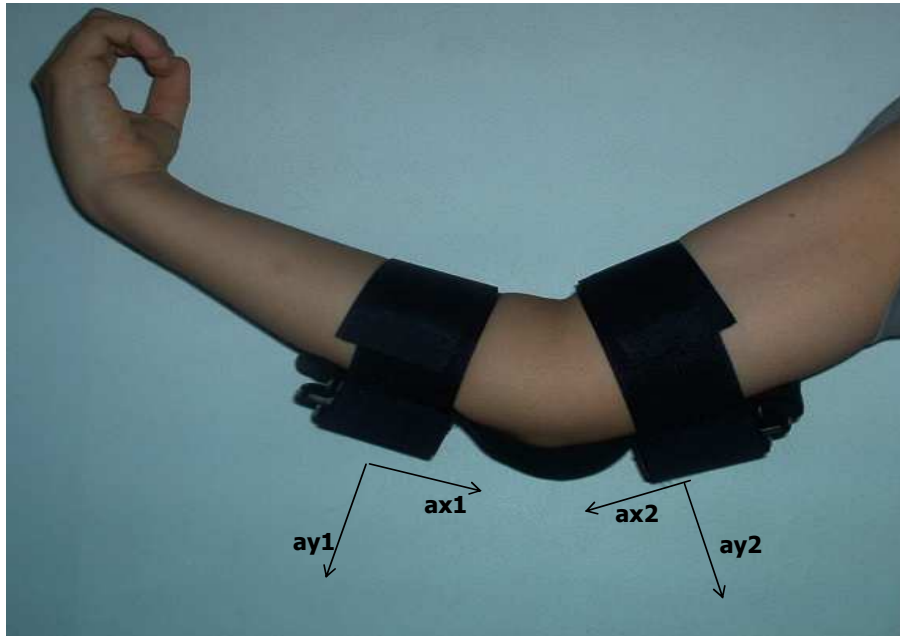


Figura 2.8: Sistema de acelerómetros ubicados alrededor del codo
(Fuente: Autor)

Primero que todo, se debe ubicar el equipo de medición, que contiene un par de acelerómetros, alrededor del brazo muy cerca al codo, entre más cercanos estén los acelerómetros, mejor será la obtención del ángulo. El plano espacial formado por los ejes x & y, debe en lo posible permanecer horizontal con respecto al eje de gravedad de la tierra.

En la figura es posible observar los dos acelerómetros ubicados en el codo. En este montaje, la magnitud de aceleración registrada por el acelerómetro 1 es aproximadamente la misma aceleración percibida por el acelerómetro 2 ($a \sim a'$), por las siguientes razones: El vector radial de rotación alrededor de la articulación es pequeño, además la fuerza centrífuga y la fuerza de giro alrededor del codo percibida por los sensores es prácticamente nula; si se toma en cuenta la rotación alrededor del hombro u otro movimiento del cuerpo, resulta en que los dos sensores por estar cercanos, percibirán la

misma magnitud de aceleración. Las componentes de aceleración del eje 'x' y eje 'y' en el acelerómetro 1 son definidas respectivamente como (a_{x1}, a_{y1}) , y las componentes del otro acelerómetro están definidas como (a_{x2}, a_{y2}) . El ángulo de unión es definido como θ .

Usando la matriz de rotación de θ , la relación entre (a_{x1}, a_{y1}) y (a_{x2}, a_{y2}) puede ser descrito así:

$$\begin{bmatrix} a_{x1} \\ a_{y1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \text{Cos}(\theta) & \text{Sen}(\theta) \\ \text{Sen}(\theta) & -\text{Cos}(\theta) \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} a_{x2} \\ a_{y2} \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

Esta ecuación matricial fue el resultado del siguiente análisis:

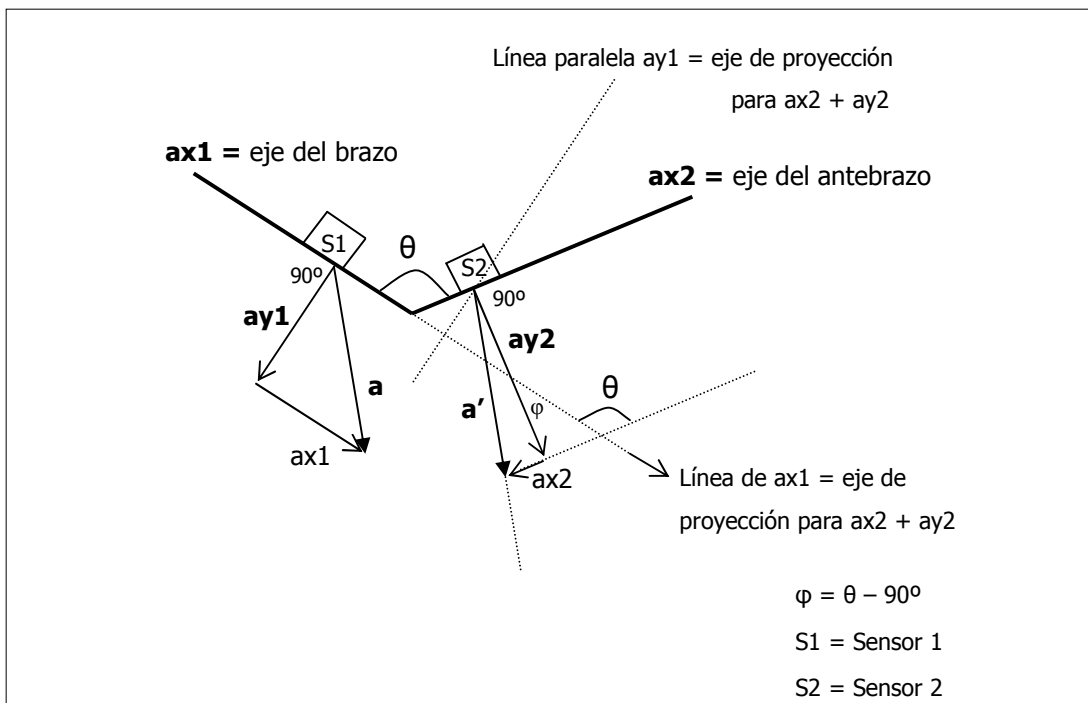


Figura 2.9 Diagrama vectorial de la aceleración y sus proyecciones
(Fuente: Autor)

El procedimiento para encontrar las ecuaciones que relacionan las aceleraciones en los diferentes ejes, consiste en unificar un par de ejes base de referencia para ambos acelerómetros, entonces los ejes escogidos son los vectores de las componentes en 'x' y en 'y' del acelerómetro 1, por lo tanto se deben proyectar los vectores a_{x2} y a_{y2} sobre la línea de la componente de aceleración a_{x1} y sobre la línea de la componente de aceleración a_{y1} . Con lo que define una ubicación relativa en el espacio del acelerómetro 2 con respecto al acelerómetro 1.

Por lo tanto. Observando la gráfica, se puede extraer fácilmente el siguiente par de ecuaciones:

$$a_{x1} = a_{x2} * \text{-Cos}(180 - \theta) + a_{y2} * \text{Cos}(\theta - 90)$$

Por identidades trigonométricas resulta:

$$\rightarrow a_{x1} = a_{x2} * \text{Cos}(\theta) + a_{y2} * \text{Sen}(\theta) \quad (2.5)$$

$$a_{y1} = a_{x2} * \text{Cos}(\theta - 90) + a_{y2} * \text{Cos}(180 - \theta)$$

Por identidades trigonométricas resulta:

$$\rightarrow a_{y1} = a_{x2} * \text{Sen}(\theta) - a_{y2} * \text{Cos}(\theta) \quad (2.6)$$

Demostrando finalmente con estas dos ecuaciones (2.5) y (2.6), la forma en que se obtuvo la ecuación matricial (2.4).

Finalmente se puede obtener el ángulo θ resolviendo el sistema de ecuaciones expuesto anteriormente de la siguiente forma:

$$\tan(\theta) = \left(\frac{a_{x2} * a_{y1} + a_{y2} * a_{x1}}{a_{x2} * a_{x1} - a_{y2} * a_{y1}} \right) \quad (2.7)$$

Entonces:

$$\theta = \tan^{-1} \left(\frac{a_{x2} * a_{y1} + a_{y2} * a_{x1}}{a_{x2} * a_{x1} - a_{y2} * a_{y1}} \right) \quad (2.8)$$

Teniendo ya resuelto el problema, cabe resaltar que la función tangente inversa de cualquier número Real, produce un valor en grados entre -90° y 90° , por lo tanto al momento de implementar la fórmula matemática, es necesario adicionarle 180° al resultado dependiendo del signo que se esté obteniendo en el denominador y en el numerador. De esta forma, para la situación que se está trabajando, es posible obtener el ángulo verdadero del codo sin importar que la extremidad esté rotando alrededor de otro punto por ejemplo con el hombro como eje de rotación. En la práctica se observó que cuando el denominador resulta negativo, se le debe sumar 180° al resultado de la ecuación (2.8). Aunque para este ejemplo de aplicación no es necesario determinar ángulos mayores a 270° , vale la pena decir que para un ángulo mayor a este valor, se debe sumar 360° al resultado obtenido en esta misma ecuación cuando el numerador es negativo y el denominador positivo.

Como ejemplo se plantea la siguiente situación:

Tenemos dos acelerómetros biaxiales acomodados como en la figura 5.8 cuyos ejes arrojan las siguientes salidas:

$$(a_{x1}, a_{y1}) = (0.0297, -0.9706)$$

$$(a_{x2}, a_{y2}) = (0.0241, -0.9706)$$

Aplicando la formula 2.8 tenemos:

$$\Theta = 183.18$$

La siguiente tabla muestra el resultado de 6 pruebas del algoritmo.

	θ°_1	θ°_2	θ°_3	θ°_4	θ°_5	θ°_6
Angulo	183.17	183.18	184.42	63.01	51.3921	36.2429
a_{x1}	0.0189	0.0297	0.0350	-0.5449	-0.5986	-0.7704
a_{y1}	-0.9760	-0.9706	-0.9760	-0.8901	-0.8579	-0.6162
a_{x2}	0.0349	0.0241	0.0402	-0.8727	-1.0177	-0.9264
a_{y2}	-0.9706	-0.9706	-0.9760	-0.0684	0.0658	0.0389

Tabla 2.1 Resultado de aplicación de fórmula para mediciones reales

Capitulo 3

Sensores inalámbricos

Con el avance tecnológico los sensores que operan inalámbricamente van ganando terreno. Si embargo debido a que es un campo nuevo su uso es limitado aún en investigación.

Hoy en día ya existe en el mercado sensores inalámbricos que son capaces de obtener medidas de temperatura, luz, movimiento entre otras aplicaciones. Cabe aclarar que la fama que tienen dichos sensores no se la han ganado de forma gratuita y se debe a ventajas como la reducción en costos de implementación y a la facilidad y sencillez con que se montan estos equipos. Además, su ingeniería es mucho más simple y se reduce notablemente el costo de los materiales; aumentan la productividad por la introducción del concepto de movilidad, flexibilidad y rápido acceso a las redes de comunicación; permite desarrollar nuevos servicios de marcado valor agregado, como por ejemplo los interfaces hombre-máquina portátiles que facilita diagnósticos, controles e intervenciones sobre el proceso al mismo tiempo que brindan la posibilidad de monitoreo y seguimiento por parte del cliente. Sus aplicaciones van desde industriales hasta las militares pudiendo por ejemplo detectar la presencia del enemigo en una operación militar; detectar defectos de manufacturación en una fábrica censando rangos de vibración anormales; monitorear el movimiento de un paciente en un hospital entre muchas otras aplicaciones.

Pero esto no para ahí, lo realmente impresionante viene cuando se logra integrar muchos sensores inalámbricos para formar una red de sensores inalámbricos (**Wireless sensor Networks**).

3.1 Generalidades de una Red de Sensores Inalámbrica

Una red de sensores inalámbrica es la conexión de muchos sensores nodos que se comunican entre si vía inalámbrica y son regidos por un nodo **Gateway** o base estación.

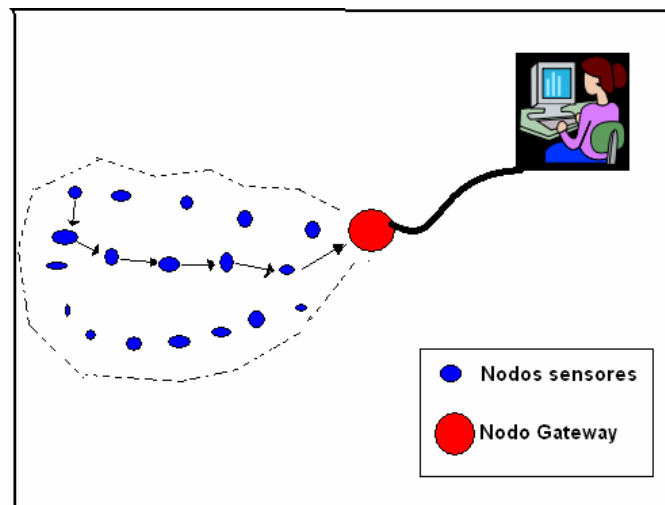


Figura 3.1: Arquitectura de una Red Inalámbrica de Sensores
(Fuente: Wikipedia, modificaciones de autor)

Dichas redes pueden monitorear y controlar condiciones en un ambiente tales como temperatura, sonidos, movimientos, presión, vibración, tomando un papel importante en múltiples situaciones. El desarrollo de estas redes fue motivado originalmente para usos militares, pero actualmente se usan en distintas aplicaciones como el monitoreo de ambientes, aplicaciones médicas, automatización de casas, control de tráfico entre otras. En dichas redes cada nodo está equipado con un radio transmisor u otro dispositivo de comunicación inalámbrica, un pequeño microcontrolador y una fuente de energía que generalmente es una batería. El tamaño de cada nodo puede variar desde el tamaño de una caja de fósforos hasta un pequeño grano de arena. El precio también puede variar desde cientos de dólares hasta unos cuantos centavos. Esto depende del tamaño de la red y la complejidad requerida en cada nodo sensor.

3.2 Tecnología Zigbee

En los últimos años el mundo ha sido testigo de un rápido desarrollo en las redes inalámbricas. Hasta ahora las redes inalámbricas se han enfocado en desarrollar altas velocidades y en ampliar su rango de aplicación. Sin embargo existen muchas aplicaciones de monitoreo y control inalámbrico para industrias y automatización de hogares que requieren una alta duración en la vida de la batería, una baja transmisión de datos y una menor complejidad de la que dan los estándares existentes. Lo que el mercado necesita es un estándar global que cumpla con los requerimientos en seguridad, confianza, baja potencia y bajo costo. El primer estándar que apuntaba hacia una Red de Área Personal Inalámbrica de Baja Transmisión (**LR-WPAN**) fue **Bluetooth**. La desventaja de **Bluetooth** en este campo se muestra en su capacidad limitada para redes con varios nodos. Para estas aplicaciones inalámbricas un nuevo estándar llamado **Zigbee** ha sido desarrollado por **Zigbee Alliance** creado bajo el estándar 802.15.4 de la **IEEE**.

Zigbee viene del nombre en inglés de las abejas recolectoras de miel las cuales usan un tipo de movimiento en zig-zag para comunicar importante información con otros miembros de su comunidad formando un gran equipo. Esta forma de comunicación es la que intentan emular los ingenieros con este tipo de protocolo. Un racimo de simples organismos separados que unidos hagan un completo equipo de trabajo. **Zigbee** también conocida con otros nombres como "**HomeRF Lite**" maneja velocidades comprendidas entre 20 KB/s y 250 KB/s y rangos entre 10 y 75 metros. Puede usar las bandas libres de 2.4 GHz, 868 MHz (en Europa) y 915 MHz (en EEUU). Una red **Zigbee** soporta hasta 64.000 nodos por red, además la capacidad de enlazarse con otras redes le da un tamaño casi ilimitado. Los nodos tienen la mayor parte del tiempo su transmisor dormido, con el objetivo de consumir menos potencia que otras tecnologías inalámbricas. El objetivo de estos nodos es tener duraciones en baterías desde 6 meses hasta por 10 años siendo limitando por la vida útil de la batería. Como comparación, la tecnología **Bluetooth**, esta diseñada para mantener sesiones de voz en forma continua y es capaz de llegar hasta 1 MB/s en distancia de hasta 10 m operando en la misma banda de 2.4GHz. Solo puede tener 8 nodos por celda y con una duración en la batería de hasta tan solo 4 horas.

3.2.1 IEEE 802.15.4

La norma IEEE 802.15.4 no estandariza el protocolo de comunicación de las capas superiores, ni la de red ni la de aplicación. Por tal razón para garantizar la operatividad entre dispositivos que manejen esta norma debe entonces especificarse los parámetros en estas capas. Para tal fin se creó un consorcio entre las industrias manufactureras de chips; Empresas proveedoras de servicios y usuarios del mercado de redes de sensores inalámbricos llamada **Zigbee Alliance**.

Las capas definidas por este importante protocolo son la capa física (**PHY**), y la capa de control de acceso al medio (**MAC**). Las especificaciones de la capa de red (**NWK**) y la de aplicación (**APL**) fueron definidas por *Zigbee Alliance*.

Componentes de la IEEE 802.15.4

En la figura 3.2 se observa los tres dispositivos usados en una red **Zigbee**. El punto verde llamado Coordinador de Área tiene conocimiento general de la red. Es el más sofisticado de los tres tipos ya que requiere una mayor memoria y poder de cómputo. Los puntos rojos son los dispositivos de función completa (**FFD**) cuyas características y funciones son soportadas por estándar **IEEE** 802.15.4. Contar con memoria y poder de cómputo adicional los hace ideales para desempeñarse como **router** en una red o podrían ser utilizados como elementos finales en una red (que son los sensores que tiene contacto con el mundo exterior). Los puntos amarillos son los dispositivos de función reducida (**RFD**), son transportadores limitados (como es especificado en el estándar). Funcionalmente son de bajo costo y poco complejos. Son generalmente encontrados como elementos finales. Los **RFD** pueden ser usados en ambientes donde el bajo consumo de potencia sea indispensable.

3.2.2 Topologías de Red [29]

La IEEE 802.15.4 puede dirigir dos tipos de redes, La tipo estrella y la punto a punto. Ambas topologías están ilustradas en la Figura 3.2. En la tecnología *Zigbee* estas dos tecnologías pueden ser combinadas para crear una red llamada **Mesh**.

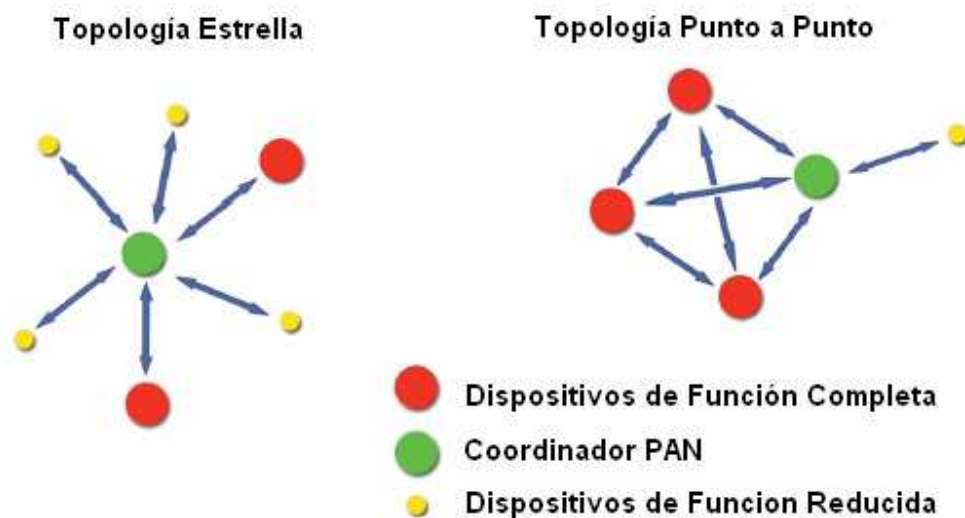


Figura 3.2: Topologías de una red Zigbee
(Fuente: [29])

Topología en Estrella

La primera **FFD** (Dispositivos de función completa) que es activada puede establecer su propia red y convertirse en una coordinadora de Red de Área Personal (**PAN**). Entonces ambos dispositivos, los **FFD** y los **RFD** (Dispositivos de Función Reducida) pueden conectarse con el coordinador **PAN**. Todos los nodos dentro del radio de influencia tiene una única red de Área Personal **PAN**. Todos los nodos dentro de una **PAN** deben comunicarse con el coordinador **PAN**.

Topología punto a punto

En una topología punto a punto hay tan solo un coordinador **PAN**, pero la diferencia con la topología en estrella consiste en cada dispositivo puede comunicarse con cualquier otro dispositivo en tanto que estén en el rango del otro. La topología punto a punto permite que sea posible formar redes mas complejas como la topología *Mesh*.

3.2.3 Zigbee Alliance

Zigbee Alliance es una asociación de compañías trabajando juntas para definir un estándar global basado en redes inalámbricas de baja potencia. La finalidad de *Zigbee Alliance* es crear especificaciones que definan como construir diferentes topologías de redes con características de seguridad de datos y aplicaciones de entornos interoperables. La asociación incluye compañías de un gran espectro de categorías, desde manufactureras de chips hasta Compañías de Integración de Sistemas. Actualmente en el 2007 los miembros de *Zigbee Alliance* son más 225 y siguen en constante crecimiento. Entre los miembros podemos encontrar compañías como **Samsung** o **Motorola**.

Las primeras especificaciones fueron ratificadas en el 2004 y la primera generación de productos *Zigbee* salieron a mediados del 2005. Uno de los grandes desafíos de *Zigbee Alliance* es hacer interoperabilidad para trabajar entre diferentes productos. Para resolver este problema *Zigbee Alliance* ha definido diferentes perfiles, dependiendo sobre que tipo de categoría pertenece cada producto. Por ejemplo existe un perfil llamado "**Home Lightning**" (Luces para el hogar) que define exactamente como productos de luces para el hogar podrían comunicarse de unos a otros sin importar la marca.

Básicamente la alianza se puede dividir en dos grandes grupos, la alianza de promotores y la alianza de participantes.

Alianza de promotores

Son los jefes de la alianza, representan un cruce de proveedores de semiconductores, de software y de sistemas de la industria. Se destacan empresas como **Motorola** y **Samsung** que trabajan para crear un sistema estándar de comunicaciones, vía radio y bidireccional, para usarlo dentro de dispositivos en domótica, automatización de edificios (inmótica), control industrial, periféricos de PC y sensores médicos.

Alianza de participantes

Los participantes tienen un interés menos comprometido en la alianza *Zigbee*; pueden asistir a las reuniones de la alianza y tener acceso a todas especificaciones preliminares. Igual que los promotores, los participantes de la alianza *Zigbee* representan una gran variedad de empresas de semiconductores como fabricantes de equipos.

3.2.4 Mercados y aplicaciones Zigbee

El estándar *Zigbee* se centra en mercados y aplicaciones específicas. El estándar *Zigbee* se ha hecho a la medida para la monitorización y aplicaciones de control. Por lo tanto, se aplica en mercados como la automatización de edificios y hogares, la atención sanitaria, control industrial, control de alumbrado.

En la automatización de edificios y hogares tiene usos como la seguridad, alarmas, control de aire acondicionado, lectura de los contadores de servicios públicos, control de iluminación, control de accesos, control de riego etc. En el área sanitaria es usada para la

monitorización de pacientes y equipos para la salud. En el control industrial se pueden controlar procesos, sensores de instrumentación entre otros. Además, debido a su baja velocidad de transmisión de datos y su naturaleza de bajo consumo, también entra en los mercados del control remoto para la electrónica de consumo y lo que se llaman Dispositivos para la Interfaz Humana (**HID**), como teclados, ratones y *joysticks*.

3.2.5 Objetivos Técnicos del Mercado Zigbee

Zigbee se ha implementado en la banda mundial de 2.4GHz, sin necesidad de licencia, o una de las bandas regionales de 868/900 MHz. El espectro de radio sin licencia, esta designado por un acuerdo internacional y pone la carga de adhesión de la especificación sobre el fabricante del equipo. No se exige a los usuarios tener una licencia para demostrar su competencia técnica, por esto es el término "sin licencia".

Debido a que el uso geográfico libre, es un objetivo, la banda de 2.4 GHz es la banda preferida debido a su asignación internacional. Hay muchas bandas sin licencias en las frecuencias más altas y más bajas. Las bandas de 2.4 GHz y 868/900 MHz fueron escogidas por estándar IEEE 802.15.4 debido a sus características de propagación. La propagación hace referencia a la manera en que las ondas de radio actúan en el medio ambiente.

Las frecuencias 868/900 MHz y 2.4 GHz tienen buena penetración tanto a través de paredes y los techos, pero tienen un rango limitado. La limitación de rangos es realmente deseable para reducir las interferencias. Finalmente, *Zigbee* está basado en IEEE 802.15.4, que es un estándar **PAN**.

Volviendo a las características deseables de sistemas basados en *Zigbee*, la instalación debe ser automática o semiautomática, con el propósito de que los consumidores puedan poner redes inalámbricas fácilmente. Además, añadir nuevo hardware a un sistema existente debe ser sencillo. Debido a que *Zigbee* reemplaza cables y otros sistemas inalámbricos, el costo debe ser bajo para hacer un cambio a *Zigbee* más ventajoso.

El hardware y las redes *Zigbee* deben permitir una transferencia de datos de 10 a 115 kbps. Esto representa cantidad de datos que pueden ser transferidos en cuanto a

protocolo de cabecera se ha retirado. El hardware *Zigbee* debe poder comunicarse sobre un rango entre 10 a 75 metros. Un hardware típico a 2.4 GHz presenta una distancia de trabajo hasta 30 metros dentro de un edificio y mas de 100 metros en campo abierto. Se pueden poner hasta 100 redes *Zigbee* y todavía funcionar. Los dispositivos finales pueden ser sensores inalámbricos o controladores.

Capítulo 4

Kit de desarrollo Sun Spot^{*}

La herramienta tecnológica con la que hemos trabajado en esta tesis, recibe el nombre de Sun Spot (**Small Programmable Object Technology**) diseñado y desarrollado por **SunMicrosystems** en USA. Como sus siglas lo indican es una tecnología de pequeños objetos programables, en donde cada unidad de dispositivo es un conjunto integrado de microprocesador, modulo de radio y sensores, el cual se comunica con los demás dispositivos de forma inalámbrica mediante el protocolo IEEE 802.15.4 a una frecuencia de 2.4 GHz.

La programación de este dispositivo se realiza mediante lenguaje Java y su ejecución de software se realiza sobre una plataforma de aplicación llamada *Squawk*, la cual se define como 'Maquina Virtual' en términos de *Java*, pero adicionalmente también hace las funciones de un sistema operativo.

Configuración

La configuración del *SPOT* contiene un procesador principal, el cual ejecuta el *Squawk* y sirve como un nodo de red inalámbrica IEEE 802.15.4. Contiene un administrador de consumo de potencia pudiendo operar en diferentes modos según las necesidades de tal forma que se pueda tener ahorro de batería. Se puede alimentar mediante una batería recargable incluida, usando el puerto USB o algún otro suministro externo de energía.

Para el sistema completo de la aplicación, se cuentan con dos tipos de dispositivos: La estación base y los *Spot* nodos con **board** de sensores.

^{*} El capítulo 4 y sus gráficas se obtuvieron de las fuentes bibliográficas [21] y [24]

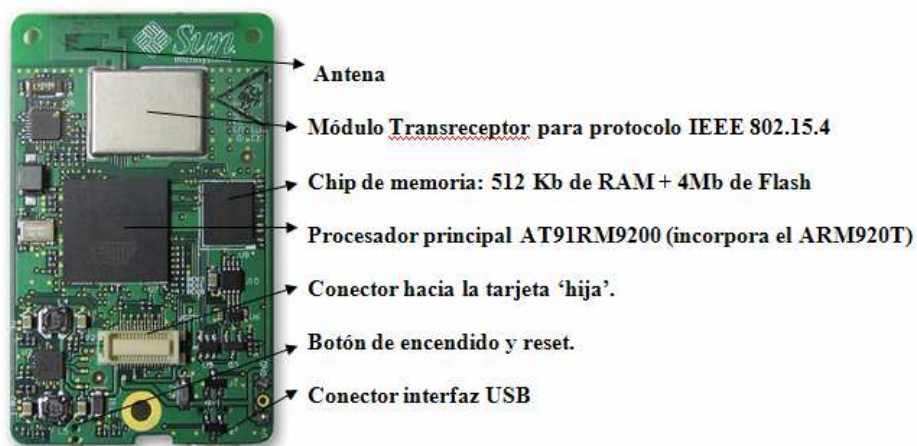
4.1 Estación base

Es un *Spot* pero sin la batería y sin la tarjeta *hija* de sensores. La energía es suministrada a través del puerto USB mientras está conectada a un **Laptop, Desktop** u otro Terminal de trabajo. Este dispositivo tiene la función de servir como puerta de enlace para comunicarse con los demás dispositivos *Spots* mediante señal de radio **standard IEEE 802.15.4**.

4.2 Spot –Nodo sensor

Está compuesto por 2 tarjetas impresas: una **board** principal alimentada por una batería recargable prismática LI-ION, y una **board hija** que contiene los sensores, botones pulsadores, **leds**, conectores auxiliares de entrada y salida. A continuación se describe en detalle.

En la figura 4.1 se puede observar la tarjeta principal y su correspondiente diagrama esquemático.



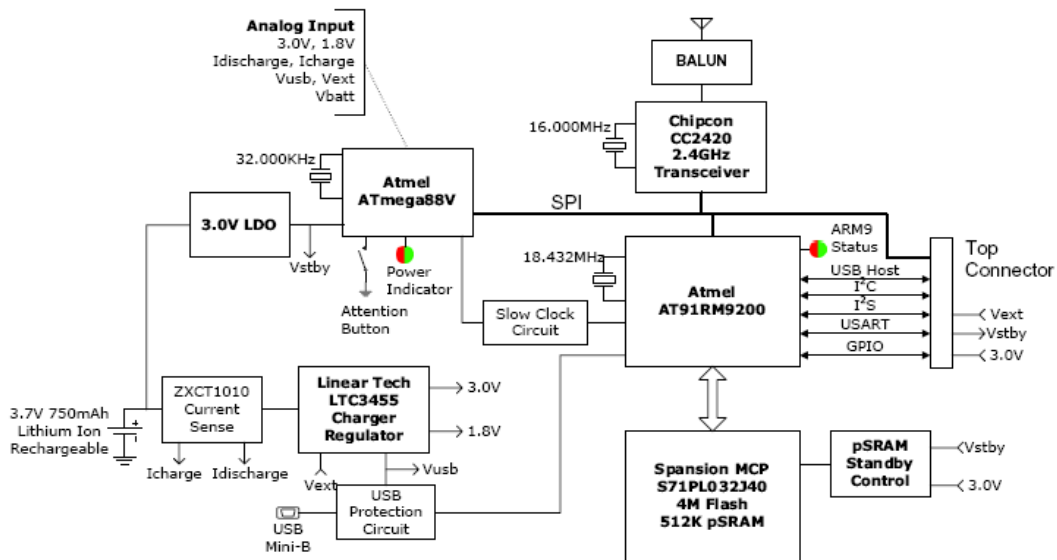


Figura 4.1: Configuración de la tarjeta principal de un Spot.

4.2.1 Procesador Principal

El procesador principal es un circuito integrado **AT91RM200 SOC** (Sistema sobre un Chip) fabricado por **Atmel**. Esta unidad incorpora el procesador **ARM920T** de arquitectura **ARM**. La unidad está empaquetada en un arreglo de 256 pines de 15 mm cuadrados y no requiere disipador de calor. El voltaje de entrada – salida para el **SOC** es 3.0 V y la alimentación para el núcleo es de 1.8 V. En condiciones normales de operación, consume 44 mW de potencia aproximadamente. El **ARM** ejecuta una velocidad máxima de reloj de 180MHz. La memoria externa es controlada y accesada usando el módulo de interfaz de bus externo (**EBI**) con controlador de memoria estática que sirve de interconexión hacia las memorias **Flash** y **pSRAM**. El bus de datos de la memoria externa es una fila de 16 bits y usa 21 bits para dirección de palabra (A1 –A21).

Cuando se oprime el botón externo de encendido o reset, El **ARM** se reinicia y la **pSRAM** se deshabilita momentáneamente.

El **ARM920T** dispone de dos fuentes de reloj que pueden ser seleccionados: el **BCLK** y el **FCLK**. Se selecciona uno de los dos para generar el reloj global. El **FCLK** es controlado desde un software programable **PLL**, mientras que el **BCLK** es controlado desde el oscilador real de 32.768 KHz, el cual se habilita cuando se inicia el dispositivo.

El **SOC** mencionado tiene un gran conjunto de unidades de interfaz periféricos, los cuales incluye: Puerto USB del host, puerto usb del dispositivo, **Ethernet MAC**, controladores de las entradas – salidas programables, controlador de Interfaz serial periférico (**SPI**), interfaz de circuitos inter-integrados (**I2C**), interfaz serial universal sincrónica / asincrónica (**USART**), controlador sincrónico serial **I2S**, interfaz de tarjeta multimedia, 3 temporizadores de 16 bits. Se puede tener acceso a estas señales mencionadas a través del conector **interboard**, sin embargo estos dispositivos no deben estar funcionando simultáneamente ya que la unidad es pequeña.

En la siguiente figura se muestran los pines del conector periférico para la tarjeta auxiliar.

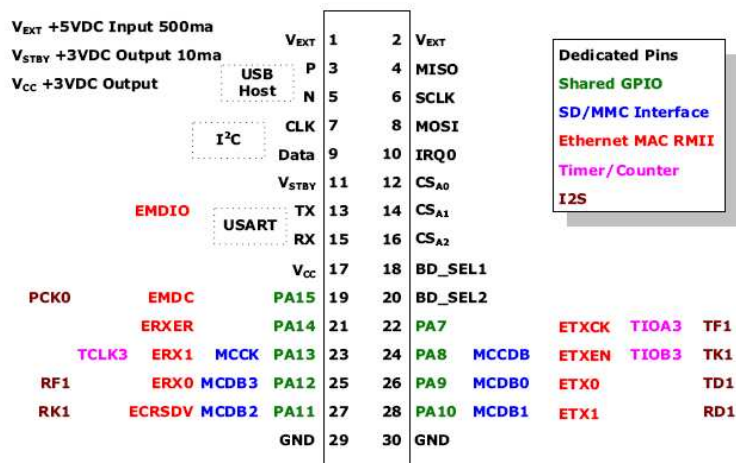


Figura 4.2: Pines del conector periférico de la tarjeta auxiliar

4.2.2 La Memoria

La memoria consiste en un empaquetado **multichip** S71PL032J40 fabricado por **Spansion**, está constituido por una memoria **flash NOR** de 4 *MByte* y una memoria **RAM** pseudo estática (**pSRAM**) de 512 *KByte*, los cuales se apilan en una cápsula de 9 X 7 mm con 56 pines. Tienen líneas de datos de 16 bits y son accesibles tanto a *byte* como a palabra. Tiene 21 líneas de dirección, escritura y salida habilitada y selector para una u otra memoria. Se alimentan con una fuente de voltaje de 3 V, controlando el suministro de energía para cada una por separado a través de **switches** y de circuitos de control de potencia.

pSRAM: Tiempo de acceso: 70 ns. Se auto actualiza y automáticamente baja consumo de potencia cuando no se está accediendo a ella. La información en la memoria se mantiene mientras esté siendo alimentada por la batería o con el puerto USB aún cuando esté el dispositivo apagado. El consumo de energía durante el modo de sueño profundo es de 8 μ A aprox. durante operación normal consume 25 mA. Está trazada para ejecutarse desde la dirección 0x20000000 hasta la 0x20080000 (512K *bytes*).

4.2.3 Memoria Flash

Tiempo de acceso: 65 ns. Durante el estado de sueño profundo, no consume potencia; Durante modo de operación normal, consume 22mA.

Uso de la memoria: La memoria flash del *spot* corre desde 0x10000000 hasta 0x10400000 (4M *bytes*), y está organizada en 8 x 8Kb seguido por 62 x 64Kb seguidos por 8 x 8Kb sectores. Se encuentra distribuida de la siguiente manera:

Dirección de inicio:	Uso de este espacio:
0x10000000	64Kb Bootloader
0x10010000	256Kb VM executable
0x10050000	512Kb Squawk bootstrap suite bytecodes
0x100D0000	448Kb Library suite bytecodes
0x10140000	384Kb Application slot 1
0x101A0000	384Kb Application slot 2
0x10200000	2Mb menos 8K disponible para almacenamiento de datos.
0x103FC000	16Kb propiedades persistentes y pagina de configuración.

4.2.4 La Batería

La batería interna es una pila de litio - ión recargable de 3.7V y 720 mAh, puede ser recargada mediante el conector USB o mediante una fuente externa de 5 V +-10%. Puede perder un 2% de su capacidad de carga máxima cada mes y un poco más si se expone a temperaturas elevadas.

La duración de la batería a partir de carga completa, depende de los modos de operación en que haya trabajado, la siguiente tabla muestra el tiempo de descarga según la condición de estado.

Tabla 4.1. Tiempo de vida de la carga de la batería según el estado de ejecución del Spot

Estado del Spot	Estado del Radio	Duración de la batería
Sueño profundo	apagado	909 días
Sueño superficial	apagado	23 horas
Sueño superficial	funcionando	15 horas
CPU trabajando	apagado	8.5 horas
CPU trabajando	funcionando	7 horas
8 leds encendidos	apagado	3 horas

4.2.5 Circuito de Control de Potencia

El Spot puede estar energizado por la batería recargable, una alimentación de voltaje externo o por el puerto USB. Por consiguiente el circuito de potencia debe controlar la recarga de la batería interna cuando el *Spot* está energizado a través del conector USB, además tiene la función de regular el suministro de potencia a los circuitos internos y controlar la potencia en estado de espera mientras el dispositivo está en modo de sueño profundo, monitorea el niveles de la batería y da aviso mediante un *led* indicador de energía. El controlador de potencia utilizado para estas funciones es un microcontrolador de 8 bits *Atmel Atmega 88* el cual tiene un cristal de baja frecuencia de 32MHz, este micro interactúa con el procesador **ARM** a través del canal *SPI* como dispositivo esclavo. En el circuito de potencia se utiliza un integrado LTC3455, el cual tiene un interruptor de voltaje con salidas de 3V para 500 mA y 1.8 V para 200 mA con el fin de limitar la corriente de entrada desde el puerto USB dependiendo del nivel de potencia suministrado o requerido, además emplea un filtro RC para proteger contra sobre tensión de entrada. Adicionalmente se emplea como apoyo un regulador de voltaje TI TPS79730 de **Texas Instrument**.

El *Spot* tiene un **firmware** para el ahorro de energía implementando 3 modos de operación.

Ejecución: Es el estado de operación básica con los procesadores y el radio trabajando. El consumo de corriente para la tarjeta principal es entre 70 mA y 120 mA, para la tarjeta de sensores es algo más de 400 mA si está siendo utilizada.

Inactivo: En este estado el reloj del procesador y el radio se apagan. De este modo el consumo es de 24 mA.

Sueño profundo: Aquí todos los reguladores se apagan excepto los controladores para el control de potencia y para la memoria **pSRAM**. El consumo de corriente es de 32 μ A. El intervalo de tiempo que gasta en salir del "sueño profundo" y "despertarse" es entre 2 ms

y 10 ms. Para poder entrar a este estado de sueño profundo, se requiere que el radio esté apagado y que no esté conectado el puerto USB a la fuente de alimentación.

Para entra al estado de inactividad, se debe hacer mediante órdenes a través de un código de programación, de igual forma para entrar al estado de sueño profundo se puede realizar por código de programación o también oprimiendo el botó de encendido por mas de 3 segundos, y para despertar el procesador puede ser mediante alarma del reloj interno, un interruptor externo o pulsando el botón de encendido.

Tabla 4.2: Consumo de potencia para una unidad SPOT

Estado de la Tarjeta del Procesador	Radio	Tarjeta de Sensores	Consumo de Corriente
Modo Sueño Profundo	Apagado	No importa	~ 33 μA
Sueño superficial - Inactivo	Apagado	Ausente	~ 24 mA
Sueño superficial - Inactivo	Apagado	Presente	~ 31 mA
Sueño superficial - Inactivo	Encendido	Ausente	~ 40 mA
Sueño superficial - Inactivo	Encendido	Presente	~ 46 mA
Despierto realizando cálculos	Apagado	Ausente	~ 80 mA
Despierto realizando cálculos	Apagado	Presente	~ 86 mA
Despierto realizando cálculos	Encendido	Ausente	~ 98 mA
Despierto realizando cálculos	Encendido	Presente	~ 104 mA

Nota: Sueño superficial significa que el dispositivo está activo pero no tiene hilos (ejecuciones) activos.

Mientras el *Spot* está tanto en modo inactivo como activo, el convertidor interno Análogo / Digital de 10 bits toma la medida de los 7 niveles de voltaje y corriente cada 50 ms, usa una referencia interna de 1.1 V para calcular el voltaje de la batería y usa regulación con 3V de referencia para otras medidas externas. Se monitorea el nivel de tensión y corriente a través de una resistencia de 0.1 Ω , la resolución de medición en la corriente es de 0.5 mA y puede medir un máximo de 512 mA en la pila.

Tabla 4.3: Rangos de tensión para los diferentes sectores del dispositivo

Voltage	Target	Error states
V_{cc}	3.0V \pm 10%	2.7V or > 3.3V power fault
V_{core}	1.8V \pm 10%	< 1.62V or > 1.98V power fault
V_{nsh}	5.0V \pm 10%	< 4.5V or > 5.5V power fault
$I_{discharge}$	< 500ma	> 500ma power fault
V_{batt}	> 3.25V	< 3.25V indicates low battery
V_{batt}	> 3.05V	< 3.05V indicates dead battery
I_{charge}	< 5ma	> 5ma indicates charging

4.2.6 Radio Inalámbrico

La comunicación de red inalámbrica usa un integrado **transceiver** de radio producido por **Texas Instrument** TICC2420 (Anteriormente era de la compañía **ChipCon**), mide 7 mm cuadrados y es alimentado por un voltaje V_{cc} de +3.0 V, internamente tiene un regulador de 1.8 V para energizar la RF y circuitos análogos internos, consume 20 mA durante al recepción y 18 mA para transmitir a 0 dBm. Trabaja según conformidad **IEEE 802.15.4** y opera entre las bandas de 2.4GHz a 2.4835GHz. Este circuito integrado contiene el transreceptor de radio frecuencia con modem banda base que utiliza método de transmisión **DSSS** (Espectro Ensanchado por Secuencia Directa) con soporte en la capa **MAC** (Control de Acceso al Medio). Entre sus características se incluye: Transmisión y Recepción por separado con 128 byte de cadena tipo **FIFO** (El Primero en Entrar es el Primero en Salir), indicador de potencia de señal recibida (**RSSI**) con -100 dBm de sensibilidad y potencia de transmisión a la salida configurada desde -24 dBm hasta 0 dBm, la tasa de transmisión efectiva es de 250 kbps, y tasa en unidades de chip de 2000 kChip/s. La sensibilidad de recepción es de -90 dBm. El control digital y la comunicación de datos usan bits en puerto **PIO** y canal **SPI**. Contiene 33 registros de estados y configuración, 15 registros de comando y 2 registros de 8 bits para las secuencias **FIFO** de transmisiones – recepciones separadas. El generador de frecuencia utiliza un cristal de

16 MHz con ± 10 ppm de precisión, ± 10 ppm de estabilidad y ± 1 ppm de envejecimiento.

4.2.7 La Antena

Tiene forma de F invertida y está trazada en la superficie de la tarjeta de circuito impreso. Se encuentra sintonizada a 2450 MHz y tiene una impedancia de entrada característica de 115Ω desbalanceada. Constituye una onda monopolo $\lambda/4$ plegado con radiación omnidireccional razonable. La antena debe mantenerse alejada de objetos metálicos o de cargas de energía y procurar no colocar sobre ella otra tarjeta impresa.

Tabla 4.4: Asignación de canal de la antena

Channel	Center Frequency	Channel	Center Frequency
11	2405MHz	19	2445MHz
12	2410MHz	20	2450MHz
13	2415MHz	21	2455MHz
14	2420MHz	22	2460MHz
15	2425MHz	23	2465MHz
16	2430MHz	24	2470MHz
17	2435MHz	25	2475MHz
18	2440MHz	26	2480MHz

El rango máximo de comunicación depende de las condiciones del ambiente, en ambiente encerrado que necesite atravesar muros, alcanza entre 10 y 50 metros, pero en espacio abierto alcanza 100 metros o incluso más bajo ambientes en condiciones perfectas. Sin embargo, el alcance de la comunicación no solo depende del espacio que lo rodea, ya que

la potencia de salida del transmisor se puede ajustar con el código del *software* por lo tanto se le permite al usuario sintonizar el rango según sea la aplicación.

La salida de potencia puede ser ajustada por un registro llamado **PA_LEVEL** en un campo de 6 bits.

Tabla 4.5: Ajustes para la potencia de salida mediante el registro PA_LEVEL

PA_LEVEL	Output Power	PA_LEVEL	Output Power
31	0dBm	15	-7dBm
27	-1dBm	11	-10dBm
23	-3dBm	7	-15dBm
19	-5dBm	3	-25dBm

Cambiar la potencia del transmisor del radio tan solo afectará ligeramente el consumo de corriente. Reduciendo la potencia de transmisión de 0dBm a -25dBm solo se ahorran 3 mA.

4.2.8 Tarjeta Impresa de Sensores

Esta tarjeta de sensores va conectada a la tarjeta principal a través de un conector DF17-30 de la compañía **Hirose**, actúa en modo esclavo con conexión **SPI** hacia la tarjeta principal. Contiene una memoria flash **SPI** para guardar información de configuración. En general cualquier comunicación desde la tarjeta principal hacia cualquier tarjeta hija, se realiza a través del canal **SPI**. En total contiene un procesador (microcontrolador) **Atmega88**, una memoria *flash*, un sensor de luz, un acelerómetro, 8 *leds* tricolor y 2 pulsadores.

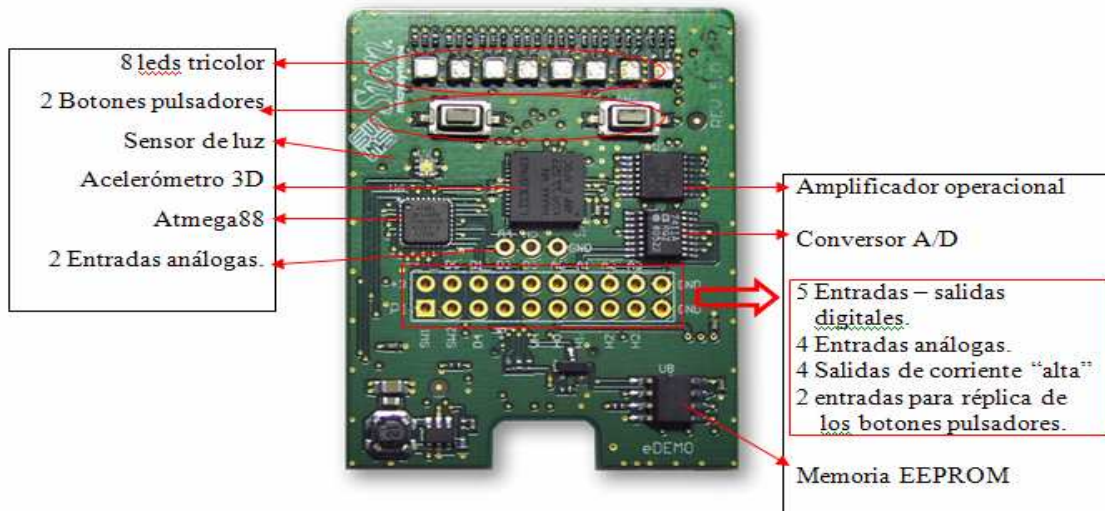


Figura 4.3: Tarjeta de Sensores de un SPOT

Se cuenta con una memoria **SPI EEPROM** de 64K x 8 U8, la cual puede ser de lectura y escritura.

El microcontrolador *Atmega88* se comunica con la tarjeta principal ARM a través del canal SPI como dispositivo esclavo, su función es controlar los *leds*, proveer multifunciones generales en los pines de entrada – salida, es capaz de hacer interrupción al ARM, controla en el acelerómetro el modo de bits, escanea las entradas análogas y reporta valores digitalizados.

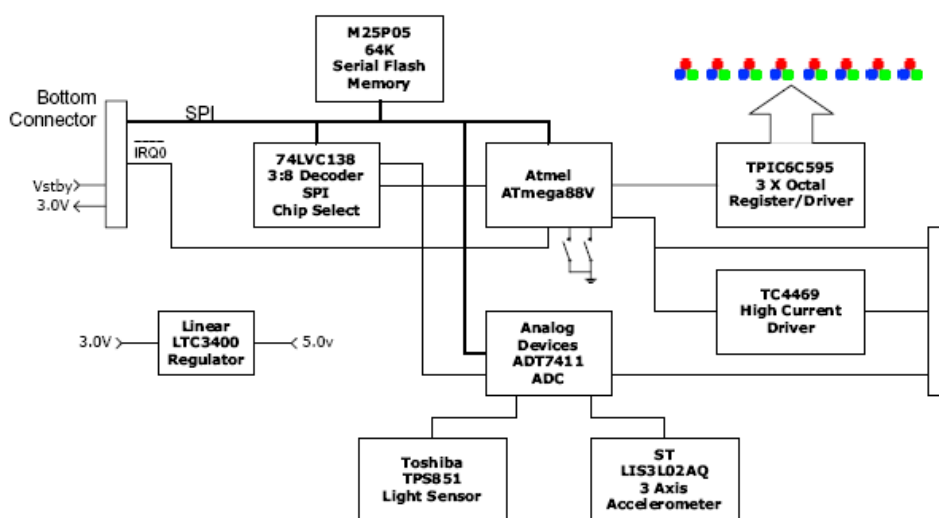


Figura 4.4: Esquema de la tarjeta de sensores de un SPOT

V_{CC} +3VDC Output 100ma Maximum	SW1	1	2	V_{CC}
V_{+5V} +5VDC Output 100ma	SW2	3	4	D0
V_H +4.5V to 18VDC Input	D4	5	6	D1
A0-3 Analog Input 10 bit 0V to 3.0VDC	V_{+5V}	7	8	D2
D0-4 GPIO	V_H	9	10	D3
H0-3 High Current Output 125ma 0V to V_H	H0	11	12	A0
	H1	13	14	A1
	H2	15	16	A2
	H3	17	18	A3
	GND	19	20	GND

Figura 4.5: Esquema de las entradas y salidas auxiliares de la tarjeta de sensores.

4.2.9 Conversor Análogo a Digital

El dispositivo conversor usado es el **ADT7411 ADC** fabricado por **Analog Devices**, el cual tiene la función de convertir las entradas análogas, recibidas desde el acelerómetro (o de algún otro sensor instalado en la tarjeta de sensores), a señales digitales hacia el microcontrolador **Atmega88**. Las entradas análogas están diseñadas para aceptar señales de voltaje análogas entre 0 y 3 Vdc, la resolución es de 1024 mV/count y el valor de señal digital se obtiene según la ecuación:

$$ADC = \frac{V_{in} * 1024}{V_{ref}} \quad (4.3)$$

donde $V_{ref} = 3.0 \text{ V}$

4.2.10 El Acelerómetro

En la tarjeta hija va montado el acelerómetro **LIS3L02AQ3**, el cual es un sensor inercial de 3 ejes fabricado por **ST Electronics**. Puede ser configurado para escoger rango máximo de $\pm 2g$ o $\pm 6g$.

La forma como van ubicados sus ejes con respecto al Spot se puede observar en la siguiente figura:

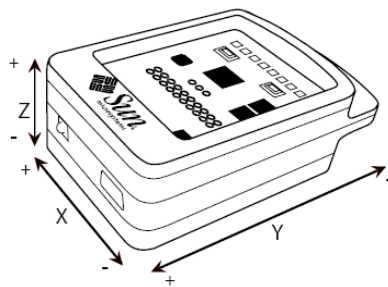


Figura 4.6: Direcciones de los ejes x, y ,z del acelerómetro LIS3L02AQ3 en un SPOT.

El acelerómetro tiene 3 voltajes de salida: V_{out_x} , V_{out_y} y V_{out_z} , representando así aceleración en 3 ejes a través de estas señales analógicas que luego son digitalizadas.

La lectura directa del acelerómetro, tal cual la envía el convertor A/D es un número entre 0 y 1023, donde 0 indica el menor valor del rango dinámico y 1023 representa el valor más alto del rango.

A partir de esta lectura transmitida por el convertor (ADC), se realiza una transformación matemática para obtener el valor en unidades de '*g-fuerza*' de la fuerza de aceleración que percibe el dispositivo, según la relación que se describe en la ecuación (4.1), la cual se aplica para la aceleración en cualquiera de sus 3 ejes.

$$g = \frac{ADC - \text{cero}G}{\text{sensibilidad}} \quad (4.1)$$

Donde $\text{cero}G$ es el parámetro de 'cero gravedad' el cual tiene un valor aproximado de 465.5 [unidades digitales]. El valor de sensibilidad depende del rango dinámico en que se encuentre operando, para un rango dinámico de $\pm 2g$ la sensibilidad es de 186.2 [unidades/g], y para rango de $\pm 6g$ la sensibilidad es de 62. Nótese que no se utiliza

unidades en mV/g debido a que se está trabajando con los datos digitalizados de 0 a 1023.

Se puede deducir que el acelerómetro puede calibrarse fácilmente ubicando el eje de aceleración paralelo al vector gravedad y en consecuencia sus otros 2 ejes de aceleración estarán perpendiculares a esta fuerza gravitatoria, por lo tanto en esta posición se podrá tomar el dato de cero gravedad, registrando el valor crudo que se lee del conversor, y también se obtiene el valor de sensibilidad a partir de las lecturas registradas para 1g y (-1g) (Ver sección 5.2.5, definición de sensibilidad).

Por cada eje, la máxima tasa de muestreo F_t es 160 Hz. El circuito posee 3 capacitores de 0.01 μF que proveen un filtro pasa bajas de un polo para limitar el ancho de banda del acelerómetro, la frecuencia de este límite es:

$$F_t = \frac{1}{2\pi * R_{out} * C.f(x, y, z)} \quad (4.2)$$

Donde **Rout** = 100 K Ω equivalente a la resistencia interna del acelerómetro.

Se ha elegido un capacitor C = 0.01 μF , en donde, según la hoja de datos del fabricante, el acelerómetro tiene una frecuencia de resonancia de 1.5 KHz, por consiguiente se tiene una adecuada frecuencia de corte para el filtro ya que el resultado $F_t = 160$ Hz es bastante menor que esta frecuencia máxima límite.

El acelerómetro tiene un modo de auto prueba (*self test*) el cual, físicamente ajusta el material interno con energía electrostática. Auto prueba es la diferencia medida entre el modo normal y el modo *self-test*. El modo *self-test* es ingresado cuando el *pin self-test* es cargado a 1, durante esta prueba, el acelerómetro tiene que estar quieto en una posición fija. Entonces 2 lecturas son tomadas de todos los 3 ejes. La primera lectura es en modo norma y la segunda es en modo *self-test*. La diferencia registrada entre los dos modos de operación para cada eje, debe caer dentro de un rango específico como lo muestra la siguiente tabla.

Tabla 4.6: Rango de voltajes asignados para cada eje en el correspondiente modo de gravedad.

Mode	Axis	Voltage Range	Reading
2g	X_axis	-20mV to -40mV	-6 to -13
6g	X_axis	-6mV to -14mV	-1 to -5
2g	Y_axis	20mV to 40mV	6 to 13
6g	Y_axis	6mV to 14mV	1 to 5
2g	Z_axis	20mV to 50mV	6 to 16
6g	Z_axis	6mV to 17mV	1 to 6

Características específicas

LIS3L02AQ3 (Especificaciones a Vdd = 3.3 V, T = 25°C) (FS = Full escala (2g o 6g).)

Tabla 4.7 Características del acelerómetro LIS3L02AQ3

PARAMETRO	Condición de prueba	Valor típico	% de tolerancia
Rango de aceleración	Pin FS conectado a tierra	± 2.0 [g]	
	Pin FS conectado a Vdd	± 6.0 [g]	
Sensibilidad	Full escala = 2g	Vdd/5 [V/g] = 660 [mV/g]	± 10 %
	Full escala = 6g	Vdd/15 [V/g] = 220 [mV/g]	± 10 %
Cambio de sensibilidad con la temperatura	Delta de 25°C	±0.01 [%/°C]	
Nivel de Cero g	T = 25°C	Vdd/2 [V]	± 6%
Cambio del nivel Cero con la temperatura	Delta de 25°C	± 0.8 [mg/°C]	
No linealidad	FS = 2g. Ejes X y Y	± 0.3 [% FS]	
	FS = 2g. Ejes Z	± 0.6 [% FS]	
Densidad de ruido de aceleración	Vdd = 3.3V Full escala = 2g	50 [$\mu\text{g} / \sqrt{\text{Hz}}$]	
Frecuencia de resonancia	Todos los ejes	1.5 KHz	
Peso		0.2 [gram]	

Características eléctricas

4. 8 Características eléctricas del acelerómetro LIS3L02AQ3

PARAMETRO	Condición de prueba	Mínimo	Típico	Máximo
Vdd		2.4 [V]	3.3 [V]	3.6 [V]
Idd	Valor medio		0.85 [mA]	1.5 [mA]
Idd Modo consumo mínimo	Valor rms		2 [µA]	5 [µA]
Impedancia de salida		80 [KΩ]	110 [KΩ]	140 [KΩ]
Manejo de carga capacitiva			320 [pF]	
Rango de temperatura		-40 [°C]		+85 [°C]

Comparación con otros acelerómetros

Si comparamos el acelerómetro de ST *Microelectronics* usado en el Spot con el de *Analog Device* utilizado en el juego *Wii*, encontramos que éste último tiene un rango dinámico de +- 3g con una sensibilidad de 300 mV/g. El ancho de banda del amplificador es similar pero el del Spot puede ajustarse con un condensador adicional. El consumo de potencia es menor en el de *Analog*, 350 µA contra 850 µA en el acelerómetro utilizado, sin embargo este tiene opción de entrar en modo de ahorro de energía en donde consumiría tan solo 5 µA. La densidad de ruido en el acelerómetro de ST es notoriamente mejor que el de *Analog Device*, cuyos valores son de $50 \mu\text{g} / \sqrt{\text{Hz}}$ contra $250 \mu\text{g} / \sqrt{\text{Hz}}$.

Lo que significa que en teoría, el acelerómetro utilizado en el Spot puede detectar niveles mínimos de aceleración mejor que el empleado en el *Wii* diseñado por *Analog Device*.

Comparación con el ADXL330 de 3 ejes

Ancho de banda límite 1.6kHz

Tensión Vdd: 1.8 to 3.6 [V]

Rango dinámico: +/- 3g

Sensibilidad: 300 mV/g

Tolerancia de sensibilidad: ±10%

Dimensiones 4mm x 4mm LFCSP

Corriente Idd (max) 0.18 mA

Densidad de ruido: $280 [\mu\text{g} / \sqrt{\text{Hz}}]$

Capítulo 5

Descripción de la herramienta de Software

El *kit* de desarrollo *Sun Spot* fue diseñado por los ingenieros de *Sun Microsystems*, quienes son los mismos creadores del lenguaje de programación *Java*. Es precisamente este lenguaje el utilizado para programar los nodos del *Sun Spot* y la interfaz gráfica.

La empresa *Sun Microsystems* lanzó a mediados de los años 90 el lenguaje de programación *Java* que, aunque en un principio fue diseñado para generar aplicaciones que corrieran sobre cualquier sistema operativo y por ello tenía aplicación incluso para controlar electrodomésticos como lavadoras, frigoríficos, etc, debido a su gran robustez e independencia de la plataforma donde se ejecutase el código. Desde sus comienzos se utilizó para la creación de componentes interactivos integrados en páginas Web y programación de aplicaciones independientes. Estos componentes se denominaron **applets** y casi todo el trabajo de los programadores se dedicó al desarrollo de éstos. Con los años, Java ha progresado enormemente en varios ámbitos como servicios **HTTP**, servidores de aplicaciones y acceso a bases de datos. Debido a la explosión tecnológica de estos últimos años Java ha desarrollado soluciones personalizadas para cada ámbito tecnológico. Sun ha agrupado cada uno de esos ámbitos en una edición distinta de su lenguaje Java. Estas ediciones son Java 2 **Standard Edition**, orientada al desarrollo de **applets** y de aplicaciones independientes de plataforma, Java 2 **Enterprise Edition**, enfocada al entorno empresarial y Java 2 **Micro Edition**, orientada a la programación de aplicaciones para pequeños dispositivos. Esta última edición de *Java Micro Edition* es la que se ha utilizado en este proyecto de grado para programar los dispositivos, y para desarrollar la interfaz gráfica se empleó la edición Estándar.

El éxito del lenguaje de programación Java y de los diversos estándares que orbitan a su alrededor es, hoy por hoy, un hecho indiscutible. Los programadores en Java son los

profesionales más demandados en el área de desarrollo de Software que, a su vez, se enmarca en la más general disciplina de las Tecnologías de la Información y las Comunicaciones. Tener conocimientos de Java se ha convertido en una necesidad a la hora de entrar en este mercado laboral.

5.1 Lenguaje de programación Java

Java es un lenguaje de programación de alto nivel con el que se puede escribir tanto programas convencionales como para Internet. Una de las ventajas significativas de Java sobre otros lenguajes de programación es que es independiente de la plataforma, tanto en código fuente como en binario. Esto quiere decir que el código producido por el compilador Java puede transportarse a cualquier plataforma (**Intel, Sparc, Motorola**, etc.) que tenga instalado una máquina virtual Java y ejecutarse. Pensado en Internet, esta característica es crucial ya que en esta red se conecta ordenadores muy distintos. En cambio, C++ por ejemplo, es independiente de la plataforma solo en código fuente, lo cual significa que cada plataforma diferente debe proporcionar el compilador adecuado para obtener el código máquina que tiene que ejecutarse.

Según lo expuesto, Java incluye dos elementos: Un Compilador y un intérprete. El compilador produce un código de *bytes* que se almacena en un fichero para ser ejecutado por el intérprete Java denominado máquina virtual de Java.

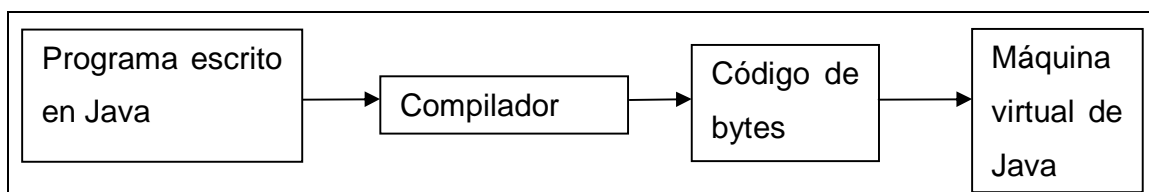


Figura 5.1: Estructura de la plataforma Java

(Fuente: Autor)

Sun, dispuesto a proporcionar las herramientas necesarias para cubrir las necesidades de todos los usuarios, creó distintas versiones de Java de acuerdo a las necesidades de cada uno. Según esto nos encontramos con que el paquete Java 2 lo podemos dividir en 3 ediciones distintas, cuyas características de cada una de las versiones serán explicadas a continuación.

5.1.1 Java 2 Standard Edition (J2SE)

Esta edición de Java es la que en cierta forma recoge la iniciativa original del lenguaje Java. Tiene las siguientes características:

- Inspirado inicialmente en C++, pero con componentes de alto nivel, como soporte nativo de **strings** y recolector de basura.
- Código independiente de la plataforma, precompilado a bytecodes intermedio y ejecutado en el cliente por una **JVM (Java Virtual Machine)**.
- Modelo de seguridad tipo **sandbox** proporcionado por la **JVM**.
- Abstracción del sistema operativo subyacente mediante un juego completo de **APIs** de programación.

Esta versión de Java contiene el conjunto básico de herramientas usadas para desarrollar Java *Applets*, así como las *APIs* orientadas a la programación de aplicaciones de usuario final: Interfaz gráfica de usuario, multimedia, redes de comunicación, etc.

5.1.2 Java 2 Enterprise Edition (J2EE)

Esta versión está orientada al entorno empresarial. El software empresarial tiene unas características propias marcadas: está pensado no para ser ejecutado en un equipo, sino para ejecutarse sobre una red de ordenadores de manera distribuida y remota mediante **EJBs (Enterprise Java Beans)**. De hecho, el sistema se monta sobre varias unidades o aplicaciones. En muchos casos, además, el software empresarial requiere que se sea capaz de integrar datos provenientes de entornos heterogéneos. Esta edición está

orientada especialmente al desarrollo de servicios *web*, servicios de nombres, persistencia de objetos, **XML**, autenticación, *APIs* para la gestión de transacciones, etc. El cometido de esta especificación es ampliar la *J2SE* para dar soporte a los requisitos de las aplicaciones de empresa.

5.1.3 Java 2 Micro Edition (J2ME)

Esta versión de Java está enfocada a la aplicación de la tecnología Java en dispositivos electrónicos con capacidades computacionales y gráficas muy reducidas, tales como el Spot, teléfonos móviles, **PDA**s o electrodomésticos inteligentes. Esta edición tiene unos componentes básicos que la diferencian de las otras versiones, como el uso de una máquina virtual denominada **KVM (Kilo Virtual Machine)**, debido a que requiere sólo unos pocos *Kilobytes* de memoria para funcionar) en vez del uso de la *JVM* clásica, inclusión de un pequeño y rápido recolector de basura y otras diferencias que ya iremos viendo más adelante.

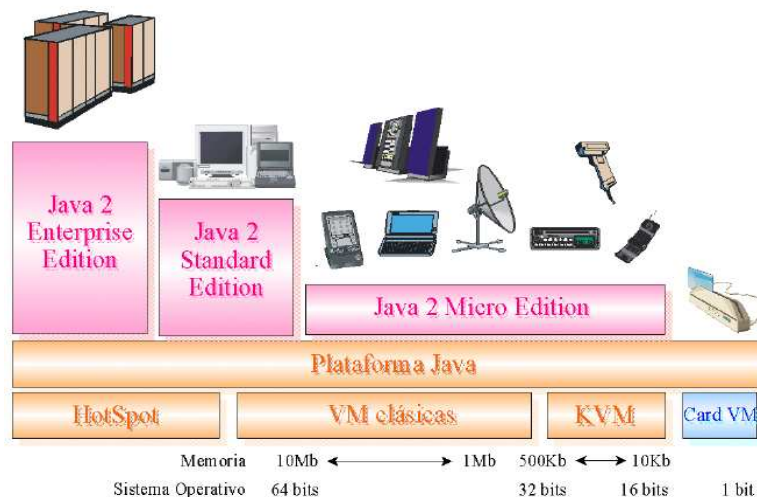


Figura 5.2: Plataforma Java y sus ediciones según su uso.

Fuente: [27]

En la actualidad no es realista ver Java como un simple lenguaje de programación, si no como un conjunto de tecnologías que abarca a todos los ámbitos de la computación con dos elementos en común:

- El código fuente en lenguaje Java es compilado a código intermedio interpretado por una **Java Virtual Machine (JVM)**, por lo que el código ya compilado es independiente de la plataforma. Para el Spot se implementó una versión mejorada de la KVM llamada **Sqwack**, en donde esta máquina virtual se adapta a las necesidades del dispositivo y tiene la modificación de que está casi en su totalidad escrita en el mismo lenguaje java.
- Todas las tecnologías comparten un conjunto más o menos amplio de *APIs* básicas del lenguaje, agrupadas principalmente en los paquetes `java.lang` y `java.io`.

5.2 Entorno de Desarrollo

Existen multitud de fabricantes que disponen de entornos de desarrollo para Java. Algunos entornos son de libre distribución que están teniendo una gran aceptación porque tienen una gran variedad de herramientas útiles y de actualización constante, pero además se pueden elegir entornos sofisticados que se debe pagar para usarlos. El entorno que se utilizó para este trabajo se llama **NetBeans**, el cual es un proyecto de creación de un entorno de libre distribución profesional patrocinado por *Sun Microsystems* y puede descargarse gratis desde la página oficial de Sun.

Tras abrir el programa **NetBeans** se procede a cargarle el programa desarrollado para los Spot de la siguiente manera:

Al abrir el programa nos encontraremos con una ventana como la mostrada en la figura 5.3. Se procede a cargar los proyectos a ejecutar. Vamos a **file** y **open Project**. O utilizamos el tercer icono de la barra de tareas.

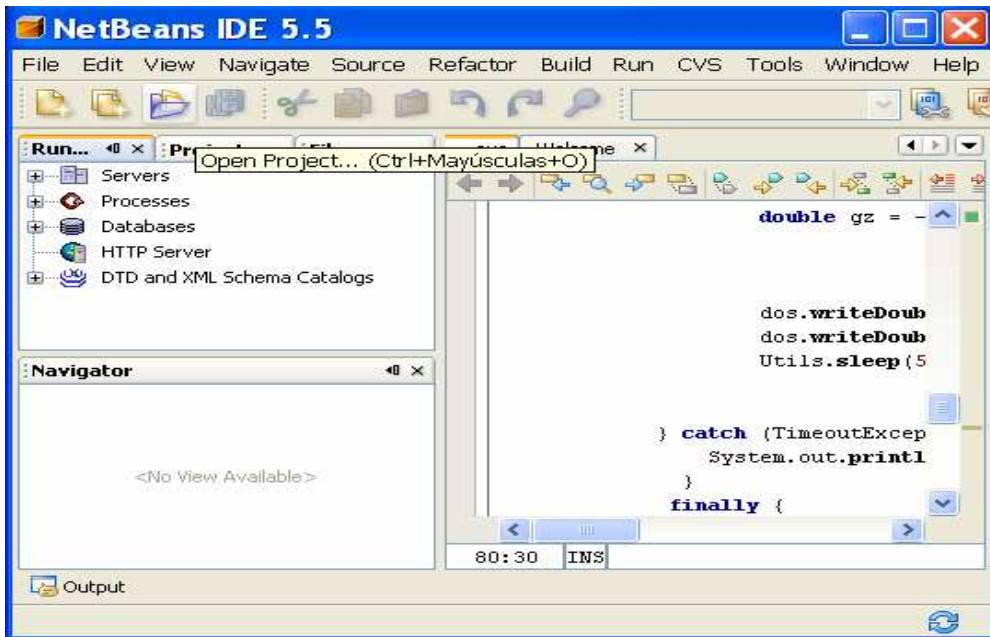


Figura 5.3: Ventana inicial de NetBeans IDE

En la ventana de *Open Project* se escogen los proyectos que se van a cargar a los Spots. En este caso se abren "Aplicación Spot0f", "Aplicación Spot1D" y "aplicación Host". Los dos primeros se cargan uno a cada Spot y el último será el programa ejecutado desde el computador.

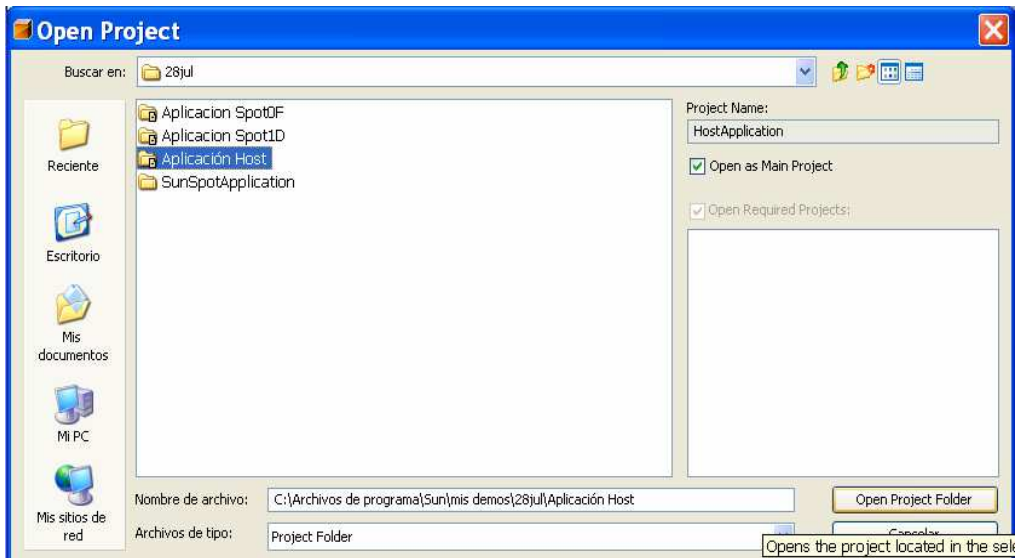


Figura 5.4: Ventana para abrir los proyectos

Conectamos el Spot al puerto USB y se le a cargar el programa. Para esto ubicamos el cursor del mouse en el proyecto correspondiente, hacemos click derecho y escogemos la opción "**Deployment to Sun SPOT**".

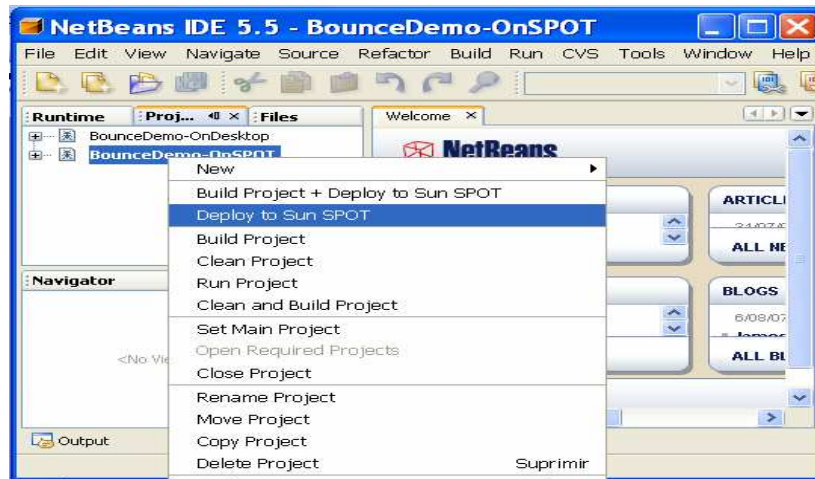


Figura 5.5: Cargar el programa al Sun SPOT

El paso final después de cargar los *SPOT* es conectar la Base estación por el puerto USB y ejecutar el programa desde el computador. Ubicamos el cursor del **mouse** en el proyecto ejecutable desde el computador, damos click derecho del *mouse* y escogemos la opción **Run Project**.

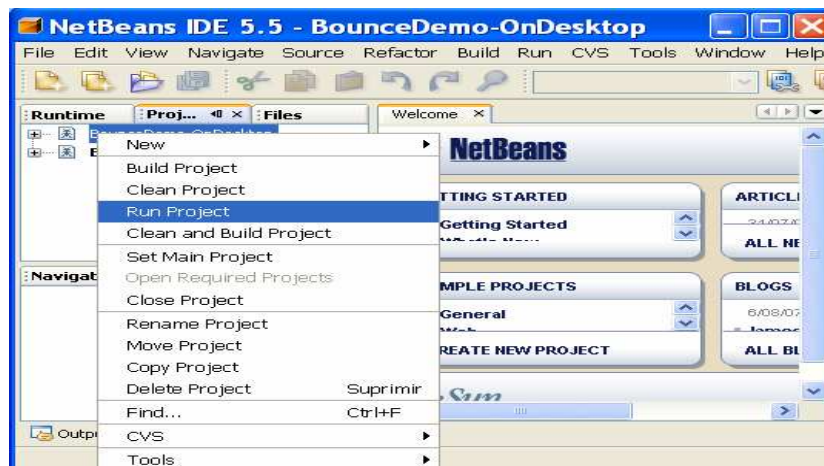


Figura 5.6: Ejecutar el programa

5.3 Software de adquisición y procesamiento

El software desarrollado en este trabajo consta de dos programas globales diferentes. El primero de ellos es montado sobre el hardware del *Spot* y el otro es el ejecutado en el terminal de recepción de datos en este caso es el computador.

5.3.1 Programación del Spot

El programa que se le instaló a cada nodo tiene como función abrir la comunicación con la base estación, luego le solicita al *Spot* el valor de aceleración para procesar este dato y finalmente enviar la información al terminal, este ciclo se repite indefinidamente mientras el Spot se encuentra encendido. El diagrama de flujo se puede en la figura 5.7.

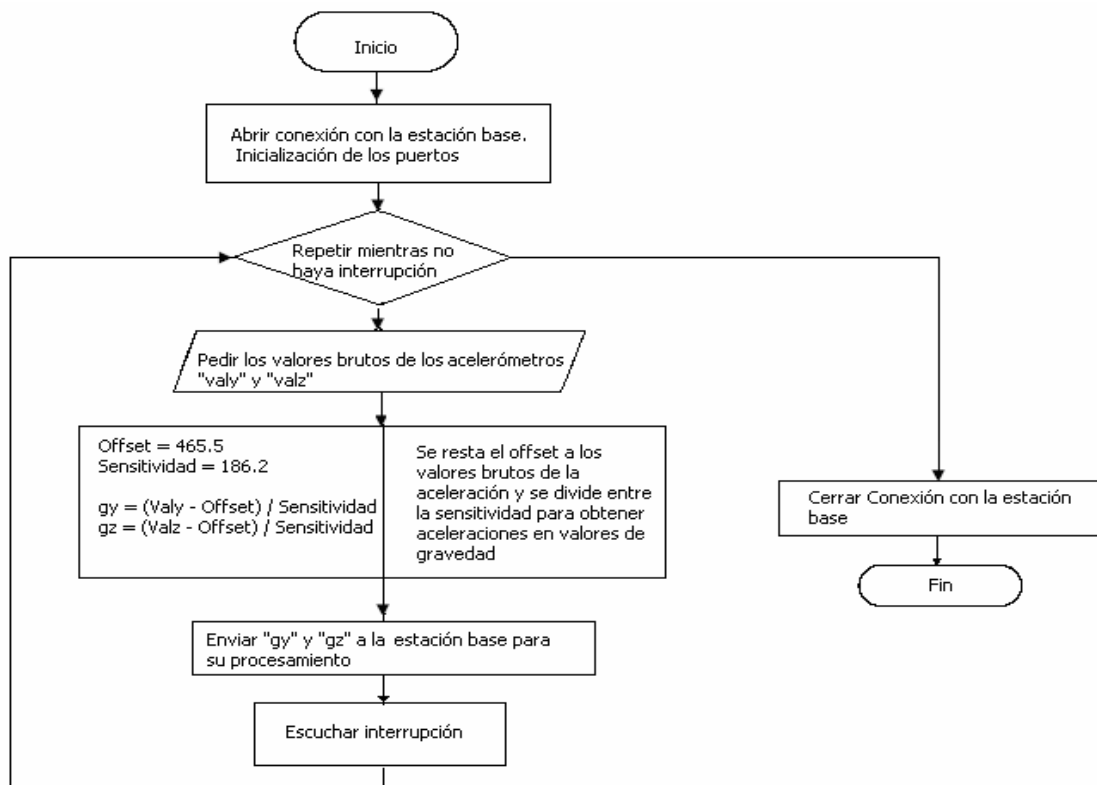


Figura 5.7: Diagrama de flujo de los Spots
(Fuente: Autores)

Código

```
private void run()throws IOException { // Aqui se inicia un método principal llamado run y previene por
excepciones de tipo IO

while(true){
    // a continuación el comando para abrir conexión al puerto 101 dando la dirección MAC del la estación
base
    RadioConnection conn2 = (RadioConnection)Connector.open("radio://0014.4F01.0000.0C9A:101");
    DataOutputStream dos = conn2.openDataOutputStream();

    try {
        int valy = accelY.getValue();           // leer el valor bruto del eje y del acelerómetro
        int valz = accelZ.getValue();           // leer el valor bruto del eje z del acelerómetro

        double gy = (valy - zeroOffset) / sensitivity; // Convierte el dato recibido a unidades de Gravedad
        double gz = 0.09+(valz - zeroOffset) / sensitivity;

        dos.writeDouble(gy); //Enviar datos del eje y
        dos.writeDouble(gz); //Enviar datos del eje z

        dos.flush();

        Utils.sleep(50);           // Pausa y Tiempo de espera .

    } catch (TimeoutException e) {
        System.out.println ("No reply from 0014.4F01.0000.0C9A");
    }
    finally {
        dos.close(); // Cerrar conexión
        conn2.close(); //Cerrar conexión
    }
}
}
```

Detalles del Código

RadioConnection: Es el comando para abrir la conexión entre la estación base y los nodos sensores.

DataOutputStream: Crea un espacio para colocar los datos de salida.

accelY.getValue(); Método para obtener el valor del acelerómetro en un eje

$double\ gy = (valy - zeroOffset) / sensitivity$: En esta ecuación se transforma el valor directo recibido en un valor real en unidades de G (gravedad). Esto se realiza restándole al valor obtenido, el valor de *Offset* dado por el fabricante o el que se obtuvo de la prueba de calibración, luego el resultado se divide en el valor de sensibilidad dado por el fabricante.

dos.writeDouble(gy): Este es el comando para escribir los datos a enviar en el espacio creado de flujo de envío.

dos.flush() : Envío del flujo de datos.

dos.close() : Cerrar conexión.

5.3.2 Programación ejecutada por el computador

El programa que se ejecuta desde la terminal, en este caso el computador, tiene como objetivo abrir la comunicación entre la estación base con cada uno de los *Spots*. Para ello, abre dos puertos y en cada uno recibe los datos de dos ejes de aceleración de forma tal que luego se puedan procesar los cuatro valores de aceleración en cada instante de posición. A continuación se muestra el diagrama de flujo y el código.

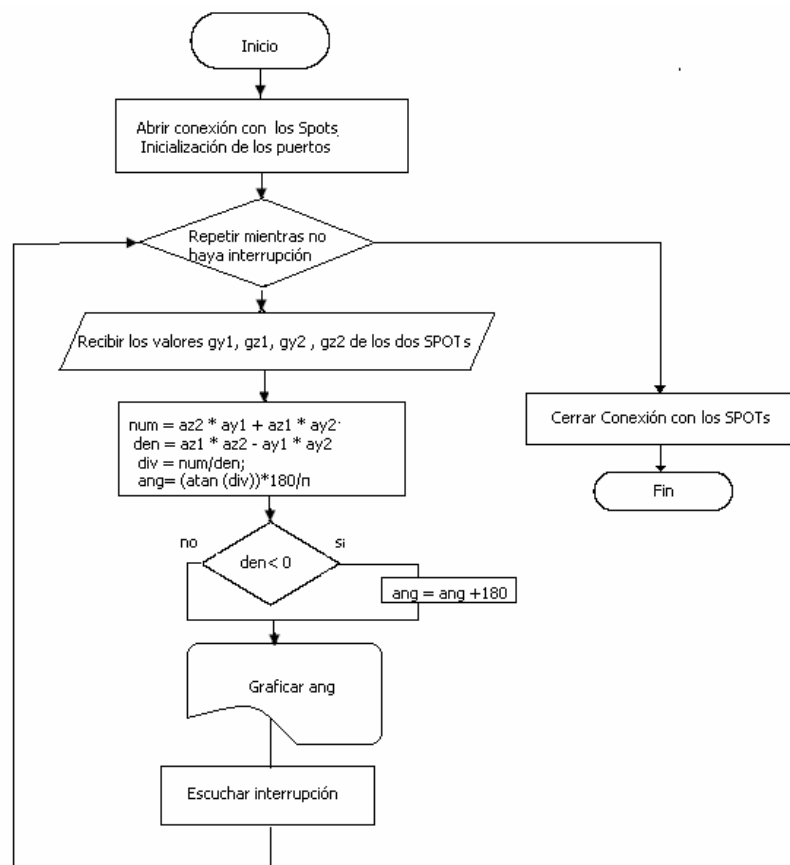


Figura 5.8: Diagrama de flujo ejecutado por el computador

Código

```
double ang, num, den, div;

while(true){
// Aquí se inicia la comunicación entre la base y los dos Spots.
    RadioConnection conn = (RadioConnection) Connector.open("radio://0014.4F01.0000.071D:100");
    DataInputStream dis = conn.openDataInputStream();
    RadioConnection conn2 = (RadioConnection)Connector.open("radio://0014.4F01.0000.090F:101");
    DataInputStream dis2 = conn2.openDataInputStream();

    try {
        double ax1, ax2, ay1, ay2;

        ax1 = dis.readDouble();    //Adquisición de los datos.
        ay1 = dis.readDouble();
        ax2 = dis2.readDouble();
        ay2 = dis2.readDouble();

        num = ax2 * ay1 + ax1 * ay2; // Procesamiento para la obtención del angulo.
        den = ax1 * ax2 - ay1 * ay2;
        div = num/den;
        ang = Math.atan(div)*180/Math.PI; // Angulo Obtenido

        if (den<0){
            ang = ang +180;
        }
        System.out.println ("El ángulo formado por la articulación es:" + ang);

    }

    catch (TimeoutException e) {
        System.out.println ("No reply from 0014.4F01.0000.071D");
        System.out.println ("No reply from 0014.4F01.0000.090F");
    }
}
```

```
    }  
    finally {  
        dis.close(); // Cierre de la comunicación  
        dis2.close();  
        conn.close();  
        conn2.close();  
    }  
}
```

Detalles del Código

RadioConnection conn = (RadioConnection) : Abre una conexión para poder recibir los datos transmitidos por los spots e ingresarlos al computador por el puerto USB.

DataInputStream dis : Abre un espacio para poder leer los datos que recibe.

dis.readDouble() : Lee los datos recibidos por un puerto

dis2.readDouble() : Lee los datos recibidos por el otro puerto

System.out.println : Comando para mostrar variables o texto en pantalla

dis.close() : Cierre el campo de recepción de datos

conn.close() : Cierra la conexión de los puertos.

5.3.3 Interfaz gráfica

La interfaz grafica aquí presentada fue elaborada mediante código java al igual que la programación anterior, utilizando las herramientas de dibujo que están presentes en el entorno de desarrollo Netbeans. El código de esta interfaz esta empaquetado dentro de una clase Java llamada ***telemetryframe*** en donde se define un objeto el cual tiene como atributos los elementos que podemos observar en la figura 5.7. La herramienta para el

desarrollo grafico contiene una paleta visual en donde se muestran los objetos de las librerías **Swing**, **AWT** y **Beans**. El recuadro que contiene la curva es un objeto de Java llamado **ScrollPane** perteneciente a la librería AWT. Los botones se obtienen del objeto llamado **JButton** perteneciente a la librería swing, al igual que los botones circulares de selección llamados **JRadioButton**. La casilla de selección cuadrada es un objeto denominado **CheckBox** perteneciente a la librería AWT.

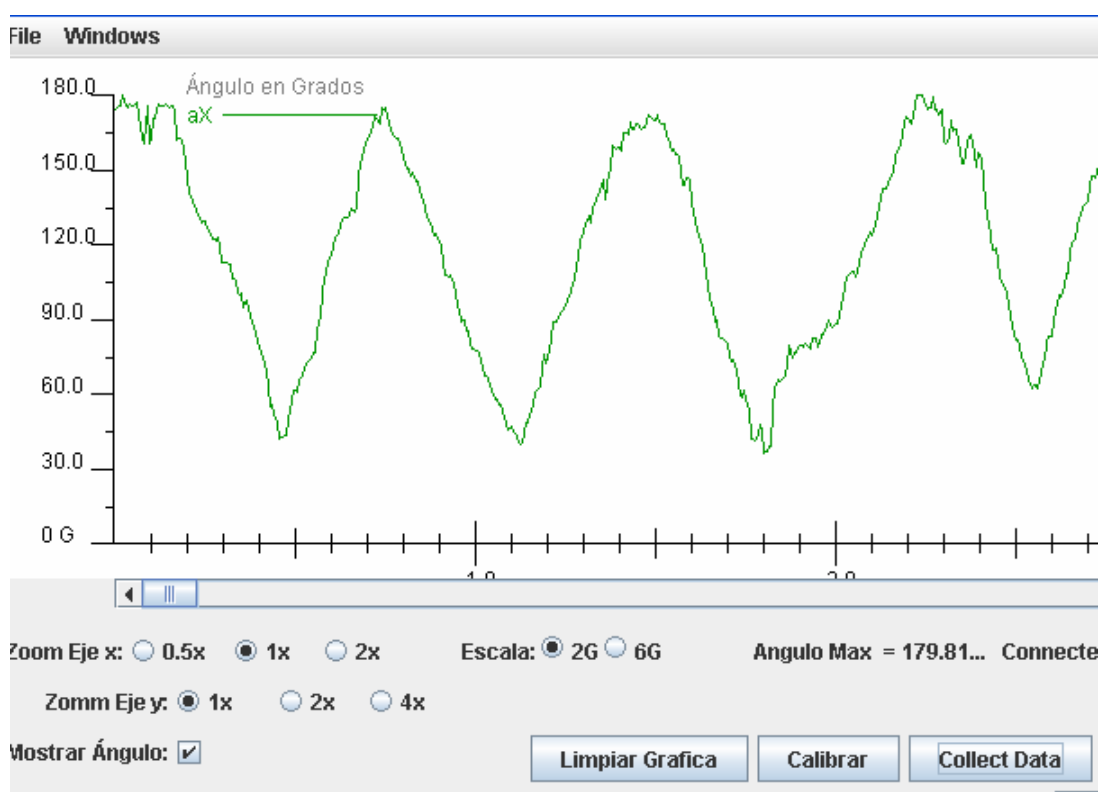


Figura 5.9: Interfaz grafica para presentación del valor de ángulo
(Fuente: Autores)

Capítulo 6

Pruebas y resultados

En esta sección se mostrarán los resultados reales obtenidos con el sistema durante la sesión de ejercicios de rehabilitación.

Se comenzó haciendo una comparación entre las medidas obtenidas con el sistema y las obtenidas con un Goniómetro sencillo que es el generalmente utilizado por los especialistas para mediciones de ángulos en las articulaciones. Para esto se construyó un brazo ideal formado por dos barras de plástico unidas por un eje giratorio sobre el cual se montaron los dispositivos, esto se hizo con el fin de que las medidas fueran más precisas y confiables. EL goniómetro y el proceso de medición se pueden apreciar en la figura 6.1.



Figura 6.1: Comparación Goniómetro- SPOTs
(Fuente: Autores)

Se tomaron registro para varios ángulos entre 180° y 0° . Los resultados fueron los siguientes:

Tabla 6.1: Resultados Comparación Goniómetro- SPOTs

Goniómetro	SPOT	Promedio del SPOT
180°	180° - 181°	180.5°
165°	163° - 165°	164°
150°	147° - 150°	148.5°
135°	132° - 135°	133.5°
120°	117° - 119°	118°
105°	102° - 105°	103.5°
90°	86° - 89°	87.5°
75°	72°	72°
60°	59°	59°
45°	43°	43°
30°	30°	30°
15°	14° - 17°	15.5°
0°	-2° - 0°	-1°

En la tabla 6.1 se pueden observar los valores obtenidos por el sistema *SPOT* en comparación con los del goniómetro. Los valores arrojados por el sistema en una posición fija varía entre un rango de 3° debido a la naturaleza de los acelerómetros. El promedio de las diferencias entre los valores del goniómetro y el *SPOT* fue de 2.38° con un máximo de 4°. Esto nos proporciona un error relativo máximo de 4.44% según la fórmula 6.1. Tomando los valores promedios de los *Spot*, se obtiene un error máximo de 4%.

$$e_x = \frac{X_m - X_v}{X_v} \quad (6.1)$$

6.1 Pruebas

Para estas pruebas se trabajó con la colaboración de la fisioterapeuta Carmen Lucía Forero y el Doctor Omar Chaves.

En la siguiente figura se muestra cómo deben ser ubicados los dos *SPOTs* sobre el brazo, así mismo se observa una secuencia de movimientos cuando el paciente realizaba movimientos de flexión y extensión.

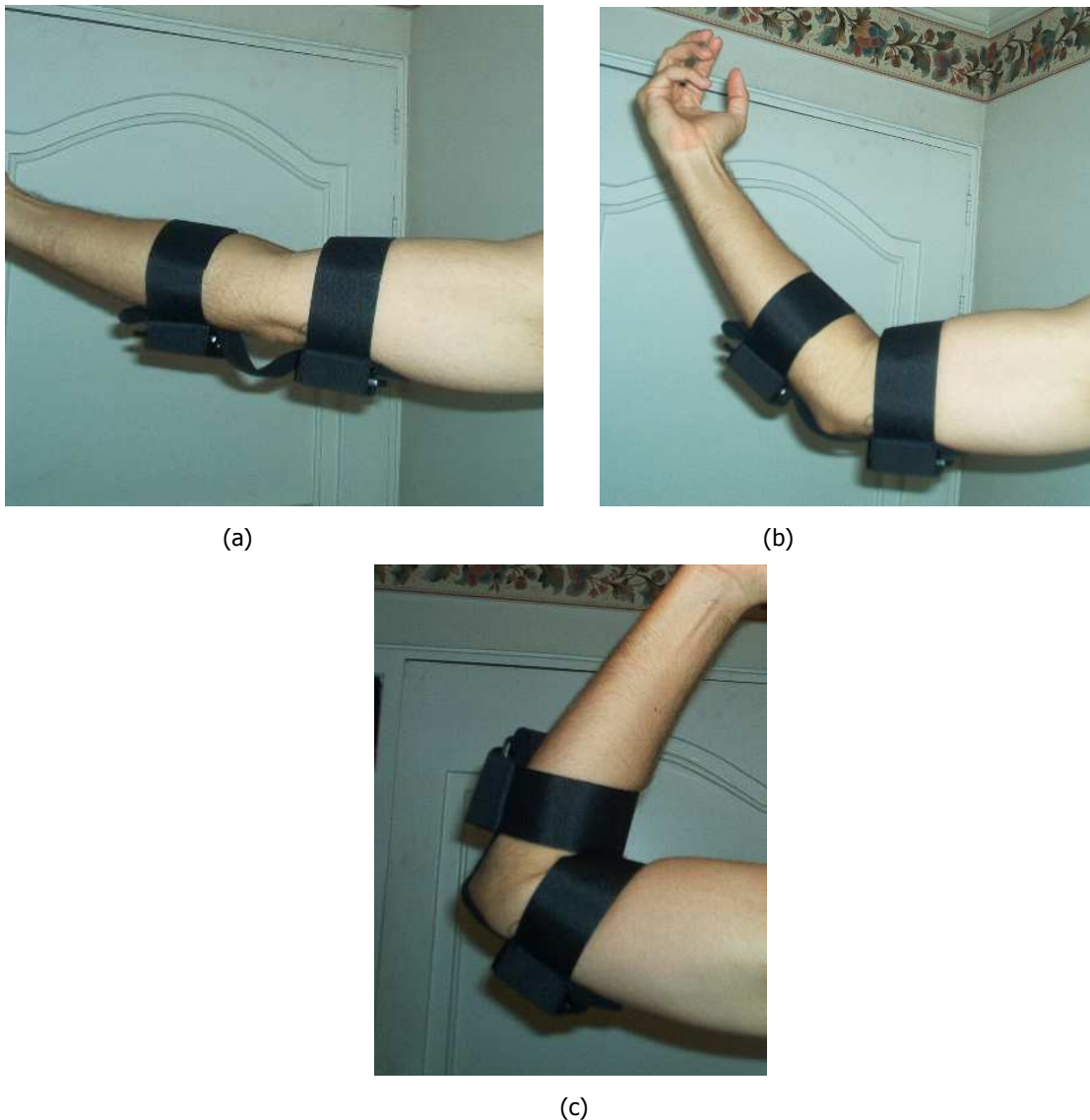


Figura 6.2: Ejemplo de movimiento y ubicación de los sensores: (a) Extensión (b) posición media (c) Flexión (Fuente: Autores)

Se realizaron ensayos con dos personas en rehabilitación con dificultades en el movimiento de flexión – Extensión del brazo. El procedimiento fue el siguiente:

Luego del periodo de inmovilización para cada paciente se procedió a iniciar ejercicios de flexo-extensión con movimientos muy suaves mientras se adapta a su nuevo estado. En este instante se le adapta cada *Spot* como muestra en la figura 6.2, detallando que queden cercanos al codo y que el eje "y" de cada aparato quede paralelo al eje del brazo o al antebrazo según corresponda. Luego de que estén debidamente acomodados los sensores se realiza durante 30 segundos los movimientos cíclicos de flexión y extensión según sea el máximo de arco que pueda lograr el paciente sin ayuda de fuerzas externas. El resultado obtenido durante este periodo de tiempo queda registrado en la gráfica la cual se puede guardar para su posterior análisis y comparación con otros resultados.

Cada paciente repetirá esta rutina para cada una de sus dos extremidades, relacionando la diferencia entre sus dos arcos de movimiento. Este informe detallado se puede observar a continuación.



a)



b)



c)

Figura 6.3: Sesión de ejercicios a menor de edad usando el dispositivo:

(a) Extensión (b) levantamiento de balón (c) Flexión

(Fuente: Autores)

Pruebas para el Paciente A

La primera prueba a ejecutar es la rutina del brazo lesionado. Estos resultados se pueden observar en la figura 6.4. De aquí se puede extraer el número de ciclos que logra hacer en 30 segundos; el valor máximo y mínimo de ángulo para determinar la longitud máxima del arco sin ayudas externas; Las posiciones en donde se presentan periodos relativamente prolongados de estacionamiento; las posiciones en donde se hacen movimientos bruscos.

Los parámetros anteriormente descritos se comparan con los datos de la prueba en el brazo sano. La rutina con el brazo sano se muestra en la figura 6.5.

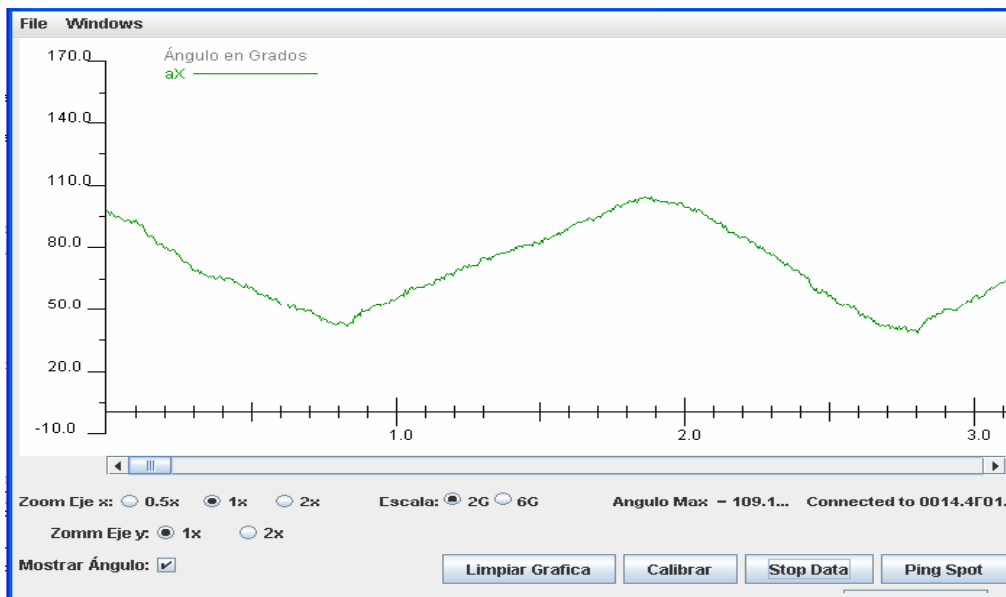


Figura 6.4: Registro del brazo lesionado del paciente A
(Fuente: Autores)

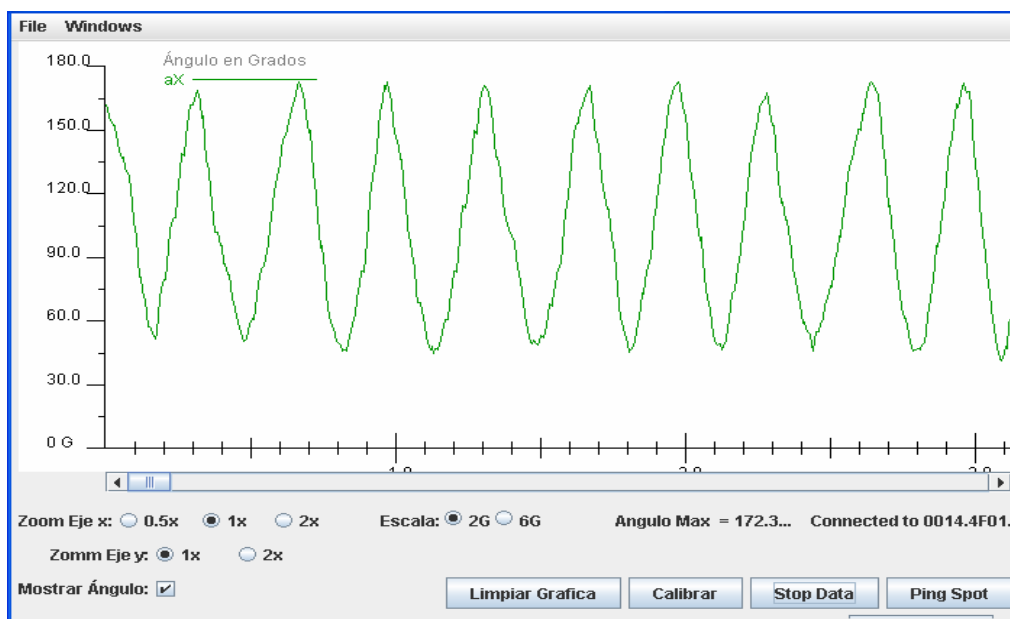


Figura 6.5: Registro del brazo sano del paciente A
(Fuente: Autores)

Pruebas para el Paciente B

Los pasos a seguir para el paciente B son los mismos que los ejecutados por el Paciente A. En seguida se muestran las graficas de los resultados para el brazo lesionado y sano respectivamente.

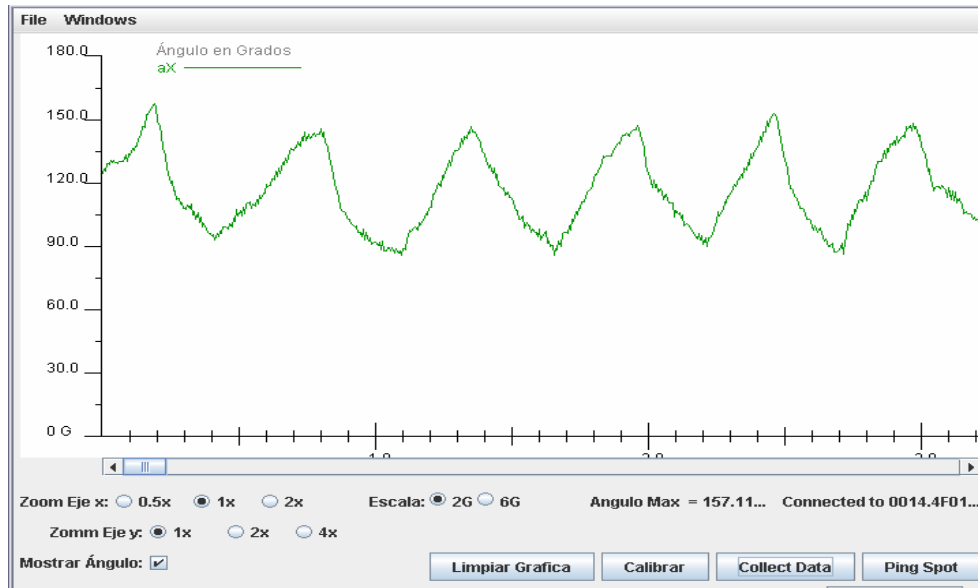


Figura 6.6: Registro del brazo lesionado del paciente B

(Fuente: Autores)

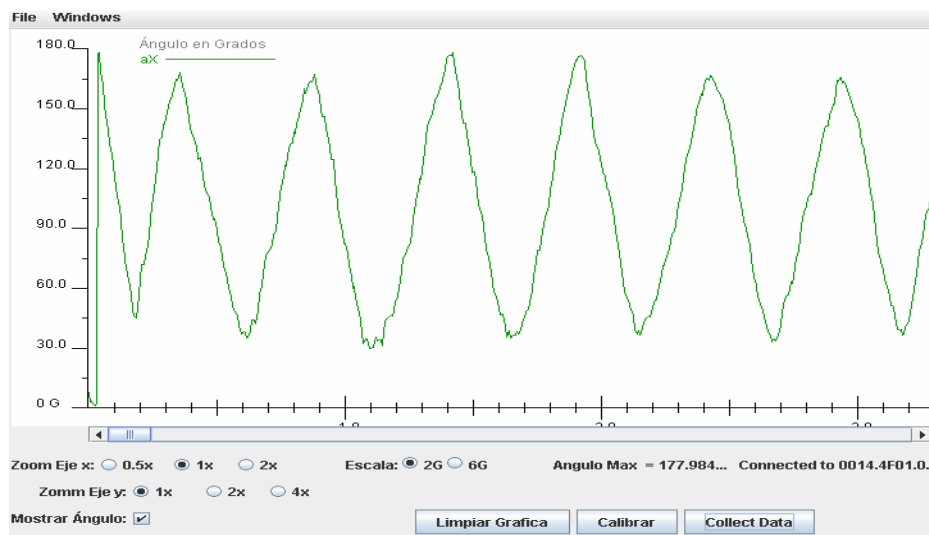


Figura 6.7: Registro del brazo sano del paciente B

(Fuente: Autores)

Aclaraciones al momento de emitir informe terapéutico

El ángulo medido por el sistema se refiere a la magnitud angular en valor absoluto del arco formado entre el brazo y el antebrazo refiriendo al codo como punto de intersección o eje de rotación. Sin embargo, en fisioterapia cuando el codo se encuentra en completa extensión, se dice que está a 0° , lo que correspondería a 180° en las gráficas obtenidas por el sistema. También se sabe que los valores normales del arco de movimiento en el codo van de 0° a 140° .

Además de lo explicado anteriormente, existe una forma particular para reportar una descripción de las limitaciones del movimiento del codo, por ejemplo, cuando se dice que un paciente lesionado tiene limitados 30° de extensión y 20° de flexión, quiere decir que el rango de su movimiento va de 30° a 120° (Tomando de referencia a 0° grados como el brazo extendido completamente), entonces cuando el especialista toma la medida de extensión con el goniómetro, dice que el movimiento de extensión va de 120° a -30° , porque le faltan 30 grados para la extensión completa que corresponde a 0° . Y al medir la flexión se dice que va de 30° a 120° .

6.2 Análisis de los resultados

Como se mencionó antes, el análisis de los resultados será la comparación entre dos registros por cada paciente. Se debe aclarar sin embargo que el análisis que se hará según las observaciones de la gráfica y no está en estrictos términos de diagnóstico médico.

Paciente A

En la graficas 6.3 y 6.4 podemos apreciar los registros del brazo en recuperación y del brazo sano respectivamente. En la rutina del brazo en recuperación se registraron 2 ciclos en los 30 segundos contra 9 ciclos en el mismo lapso de tiempo en el brazo sano. El arco de movimiento en el brazo en recuperación va desde 109.1° hasta 45° contra 172.3°

hasta 45° en el brazo sano. Se puede concluir de esta rutina de ejercicios que en el brazo lesionado no hay extensión completa con una disminución de 63.2° en el arco de movimiento.

Paciente B

En las graficas 6.5 y 6.6 podemos apreciar los registros del brazo en recuperación y del brazo sano respectivamente. En la rutina del brazo en recuperación se registraron 5 ciclos en los 30 segundos contra 7 ciclos en el mismo lapso de tiempo en el brazo sano. El arco de movimiento en el brazo en recuperación va desde 157.1° hasta 90°, contra 177.9° hasta 35° en el brazo sano. Se puede concluir de esta rutina de ejercicios que en el brazo lesionado no hay extensión ni flexión completa con una disminución de 20.8° en extensión y de 55° en flexión. En la tabla 6.2 observamos los datos obtenidos con los voluntarios.

Tabla 6.2: comparación de Resultados

	Extensión Máxima		Flexión Máxima		Arco de Movimiento		Nº de Ciclos en 30s	
	Brazo Lesionado	Brazo sano	Brazo Lesionado	Brazo sano	Brazo Lesionado	Brazo sano	Brazo Lesionado	Brazo sano
PACIENTE A	109.1°	172.3°	45°	45°	64.1	127.3°	2	9
PACIENTE B	157.1°	177.9°	90°	35°	67.1°	142.9°	5	7

Se puede observar una diferencia en la forma de las gráficas que describen el movimiento del brazo lesionado para los dos pacientes, en cambio la diferencia no es tanta entre la forma de las gráficas que describen el movimiento del brazo normal en los dos pacientes. Ya que comparando los movimientos en el brazo lesionado de uno y otro, se observa que el paciente A presenta dificultad en la velocidad del movimiento, pero los realiza de manera uniforme, en cambio el paciente B realiza los movimientos más rápidos logrando hacer más ciclos en el mismo instante de tiempo, pero realiza movimientos bruscos en el instante que comienza a flexionar, comparando también que el movimiento que realiza con más lentitud es en los instantes en que finaliza la extensión.

Conclusiones

En este trabajo se ha investigado la aplicación de la tecnología de acelerómetros dentro de un sistema inalámbrico, vista como una solución a una necesidad en el área de la medicina y su potencial uso en otras áreas. En base a esto se puede concluir lo siguiente:

Se ha dado un paso relevante para el proyecto RadioGis sobre la Convergencia de las Comunicaciones en Colombia, adquiriendo las experiencias y tecnologías apropiadas que proyecta el desarrollo de novedosos servicios de telecomunicaciones. De manera paralela a este logro, se desarrolló una solución novedosa de apoyo en la rehabilitación del codo.

Se obtuvo una herramienta inalámbrica y portátil denominada "Goniómetro Digital" capaz de tomar medidas angulares obteniendo señal de transmisión hasta en un radio de 15 metros con obstáculos y 100 metros en campo libre.

El acelerómetro adquirido dentro de los nodos sensores cumple con las necesidades propuestas por el fisioterapeuta para la medición de ángulo.

Se logró crear una interfaz que permite visualizar el arco de movimiento en tiempo real, obteniendo una primera versión. Las versiones posteriores se orientarán a mejorar el producto de la mano de los especialistas en el área de la salud, buscando satisfacer cada vez más las necesidades.

La implementación realizada con los dispositivos inalámbricos desarrollados por Sun, ha demostrado que la tecnología de software y hardware es muy efectiva cuando se diseña en dimensiones pequeñas y se integra en sistemas embebidos y compactos. Así mismo se concluye que esta novedosa tecnología permite desarrollar una gran variedad de soluciones a diversas necesidades, tantas, como la imaginación en la mente humana se alcance a idear.

Recomendaciones

Se motiva a los desarrolladores a crear aplicaciones de alto nivel mucho más complejas que permitan aprovechar el gran potencial que ofrecen los dispositivos SunSpot, ya que sus múltiples entradas y salidas auxiliares permiten conectar varios tipos de sensores, que junto con la comunicación Zigbee podría ofrecer valiosos servicios en cualquier área como automatización, control, robótica entre otras más.

Se obtuvo un error promedio de $\pm 1^\circ$ al comparar el sistema Sun Spot con una regla goniométrica, debido a fluctuaciones por la naturaleza del acelerómetro, lo que puede ser mejorado haciendo un estudio más a fondo de las características del acelerómetro o alternativamente realizar por programación una corrección sacando un valor promedio entre el rango de fluctuación.

Según los resultados obtenidos con los pacientes se destaca la diferencia del comportamiento entre articulaciones sanas y articulaciones enfermas, lo cual nos indica que la herramienta cumple su función como ayuda en la rehabilitación de los pacientes. Sin embargo el sistema podría ser mejorado haciendo un estudio más amplio con encuestas sobre las necesidades propias de cada especialista, esta tarea está siendo desarrollada por Marisol Julieth Vanegas D. estudiante de Diseño Industrial quien es colaboradora de este proyecto.

La adquisición de este dispositivo estimula al estudio del estado del arte para construir nuestros propios diseños electrónicos tomando como modelo esta avanzada tecnología adquirida.

Aplicaciones como estas permiten acercar las líneas de investigación existentes en la escuela E3T ya que despierta el interés de varios proyectos de investigación. Por esto invitamos tanto al estudiantado como a los docentes a que trabajen de una manera más unida.

Bibliografía

- [1] KURATA, Satoshi. MAKIKAWA, Masaaki. COBAYASHI, Hideteru. TAKAHASHI, Ayumu. TOKUE, Rinzo. ***Joint Motion Monitoring by accelerometers set at both near sides around the joint.*** Artículo procedente de la 20ª conferencia anual internacional de la IEEE en la sociedad de Medicina y Biología. 1936-1939. Año: 1998.
- [2] Victor Shnayder, Bor-rong Chen, Konrad Lorincz, Thaddeus R. F. Fulford-Jones, y Matt Welsh. ***Sensor Networks for medical care.*** Reporte técnico TR-08-05. División de ingenierías y ciencias aplicadas, Universidad de Harvard. 2005.
- [3] Yifei Wang. ***Human movement tracking using a wearable wireless sensor network.*** A thesis submitted to the graduate faculty in partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science. Iowa State University. 2005
- [4] ACEVEDO SIERRA, William Eduardo. "Acelerómetro. Principios y aplicación del sensor de aceleración empleando la tecnología mems (micro electro-mechanical systems)". Universidad Industrial De Santander, Facultad De Ingenierías Físico-Mecánicas, Escuela De Ingenierías Eléctrica, Electrónica Y De Telecomunicaciones, Grupo De Investigación "Cemos". 2004.
- [5] CEPEDA GÓMEZ , Rudy. OCHOA DÍAZ, Claudia. "Diseño de un Equipo Prototipo para la Medición de Ángulos Articulares del Miembro Inferior en el Plano Sagital Utilizando Acelerómetros". Tesis de grado. UIS. 2006.
- [6] CALDERÓN ARBOLEDA, Jhon Jairo. MANTILLA JAIMES Carlos. "Diseño, Construcción Y Evaluación De Una Red Inalámbrica De Sensores Zigbee 802.15.4". Tesis de grado Ingeniería Electrónica. UDI. 2005.
- [7] Página web SunSpot: <http://www.sunspotworld.com>
- [8] Descripción del producto SunSpot: <http://www.sunspotworld.com/products/>

- [9] Página de Sun Microsystem: <http://research.sun.com/>
- [10] Página oficial ZigBee: <http://www.zigbee.org>.
- [11] ZigBee Alliance, "ZigBee Specification", San Ramon, California, 2005
- [12] Crossbow. <http://www.xbow.com/Products/productsdetails.aspx?sid=3>
- [13] Crossbow, "Mote Hardware Session".
http://www.xbow.com/Support/Support_pdf_files/Motetraining/Hardware.pdf.
- [14] Daniels. *Pruebas funcionales musculares*. Capítulo 4, Flexión del codo. pag: 108-120. 1996.
- [15] KAPANDJI, *Fisiología articular1: Miembro superior. Capítulo 2 - El codo*. pag: 82 - 106. 2002.
- [16] RASCH, Philip J y BURKE, Roger K. *Kinesiología y Anatomía Aplicada*. El Ateneo, 1985.
- [17] NORDIN, Margareta. *Biomecánica básica del sistema musculoesquelético*. McGraw-Hill Interamericana. 2004.
- [18] Olga C. Giraldo, *Rehabilitación en las Fracturas de Miembro Superior*. Universidad Autónoma de Manizales – Colombia, 2005.
- [19] W. Jovanov, A. Milenkovic, C. Otto and P. C. de Groen, *A wireless body area network of intelligent motion sensors for computer assisted physical rehabilitation*. Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation, 2005.
- [20] C. OTTO, A. MILENKOVIĆ, C. SANDERS, E. JOVANOVIĆ, *SYSTEM ARCHITECTURE OF A WIRELESS BODY AREA SENSOR NETWORK FOR UBIQUITOUS HEALTH MONITORING*. University of Alabama in Huntsville. 2006.
- [21] Sun Microsystems, *Small Programmable Object Technology (Sun SPOT) Developer's Guide*. Sun, 2006.
- [22] IEEE Computer Society, *IEEE Std 802.15.4*. 2006.
- [23] S. Ritter and A. Caicedo, *Java™ Technology and Smart Dust: Building Intelligent Sensor Networks*. Sun Microsystems. 2005.

- [24] Sun Microsystems, *Small Programmable Object Technology (Sun SPOT) Theory of Operation*. Sun Labs, 2006.
- [25] Herbert Schildt, *JAVA2 Manual de Referencia 4ª edición - Serie Osborne Mc Graw Hill*. 2001.
- [26] Francisco Javier Ceballos. *Java2 - Curso De Programación*. Editorial Ra- Ma.
- [27] Sergio Gálvez. Lucas Ortega. *Java a tope: J2ME(Java 2 Micro Edition)*. Dpto de Lenguajes y Ciencias de la Computación. Universidad de Málaga. 2003.
- [28] ORTEGA Homero, *Hacia las redes de Próxima Generación*. Simposio Internacional de Investigación y desarrollo de Electrónica y Telecomunicaciones. Bogotá, 2001.
- [29] Johan Lönn, Jonas Olsson, *ZigBee for wireless networking*. Marzo 15 de 2005.

[30] Páginas web de fabricantes:

- ✓ www.ti.com : Texas Instruments y Burr Brown
- ✓ www.motorola.com : Motorola
- ✓ www.analog.com : Analog Devices
- ✓ www.st.com : ST Microelectronics
- ✓ www.national.com : National Semiconductors
- ✓ www.ni.com : National Instruments

[31] Páginas web de distribuidores:

- ✓ www.alibaba.com : Alibabá
- ✓ www.moteiv.com/ : moteiv.
- ✓ <http://www.easysen.com/> : easysen.