

**DISEÑO Y DESARROLLO DE UN GONIÓMETRO BASADO EN SENSORES
CINEMÁTICOS CON COMUNICACIÓN INALÁMBRICA EN TIEMPO REAL.**

JULIÁN CAMILO HENAO HOYOS

JOHNNATAN ALEXANDER LÓPEZ BARRETO

UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA

ESCUELA DE INGENIERÍA

FACULTAD DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA

GRUPO DE INVESTIGACIÓN EN BIOINGENIERÍA

MEDELLÍN

2013

**DISEÑO Y DESARROLLO DE UN GONIÓMETRO BASADO EN SENSORES
CINEMÁTICOS CON COMUNICACIÓN INALÁMBRICA EN TIEMPO REAL.**

JULIÁN CAMILO HENAO HOYOS

JOHNNATAN ALEXANDER LÓPEZ BARRETO

Trabajo de grado para optar al título de ingeniero electrónico

Director

ANDRÉS FELIPE OROZCO DUQUE

Ingeniero Electrónico, Especialista en Ingeniería Biomédica

UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA

ESCUELA DE INGENIERÍA

FACULTAD DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA

GRUPO DE INVESTIGACIÓN EN BIOINGENIERÍA

MEDELLÍN

2013

Nota de aceptación

Firma

Nombre:

Presidente del jurado

Firma

Nombre:

Jurado

Firma

Nombre:

Jurado

Medellín, Marzo 30 de 2013

TABLA DE CONTENIDO

GLOSARIO	10
INTRODUCCIÓN	13
OBJETIVOS	14
OBJETIVO GENERAL.....	14
OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	14
1. MARCO TEÓRICO	15
1.1 OBJETIVOS DE LA GONIOMETRÍA EN MEDICINA	20
1.2 APLICACIONES DE LA GONIOMETRÍA EN LA SALUD	21
1.3 PLANIMETRÍA DEL CUERPO HUMANO	22
1.3.1 PLANO CORONAL O FRONTAL.....	24
1.3.2 PLANO SAGITAL.....	25
1.3.3 PLANO TRANSVERSAL.....	26
1.4 VALORES PROMEDIO DEL MOVIMIENTO ARTICULAR	27
1.4.1 GONIOMETRÍA DE LOS MIEMBROS SUPERIORES.....	27
1.4.2 GONIOMETRÍA DE LOS MIEMBROS INFERIORES.....	28
2. DISPOSITIVOS Y HERRAMIENTAS	29
2.1 MICROCONTROLADOR MCF51QE128.....	29
2.2 ACELERÓMETROS	36
2.3 GIRÓSCOPOS	37
2.4 MÓDULO BLUETOOTH	39
2.4.1 DIAGRAMA DE ASIGNACIÓN DE PINES MÓDULO RN42.....	41
2.5 ANDROID	43
2.6 APLICACIONES MÓVILES	46
3. IMPLEMENTACIÓN DEL HARDWARE	47

3.1 SISTEMA DE ALIMENTACIÓN Y CARGA	48
3.2 CIRCUITO DEL MICROCONTROLADOR	49
4. SOFTWARE DEL MICROCONTROLADOR	55
4.1 OBTENCIÓN DE DATOS DE LOS SENSORES CINEMÁTICOS	56
5. APLICACIÓN MÓVIL	61
5.1 EXPLICACIÓN BÁSICA DE LA APLICACIÓN MÓVIL	62
5.2 CÓMO DESCARGAR LA APLICACIÓN	68
CONCLUSIONES.....	70
BIBLIOGRAFÍA.....	71
ANEXOS	¡Error! Marcador no definido.

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1: Gnomon.	16
Figura 2: Goniómetro De Regletas.	19
Figura 3: Medición estática de la posición de una articulación en el espacio.	20
Figura 4: Medición dinámica del arco de movimiento de una articulación.	21
Figura 5: Posición anatómica del cuerpo humano.	23
Figura 6: Plano anatómico coronal o frontal.	24
Figura 7: Plano anatómico Sagital.	25
Figura 8: Plano anatómico Transversal.	26
Figura 9: Microcontrolador MCF51QE128.....	30
Figura 10: Representación de la trama de una transmisión IIC.....	31
Figura 11: Diagrama de bloques módulo IIC.	32
Figura 12: Diagrama de bloques Transmisión SCI.....	34
Figura 13: Diagrama de bloques Recepción SCI.....	35
Figura 14: Módulo de acelerómetro ADXL345 y Giróscopo ITG3200	36
Figura 15: Marca Registrada Bluetooth.	39
Figura 16: Módulo Bluetooth RN42.	40
Figura 17: Asignación de pines módulo RN42.....	41
Figura 18: Marca registrada Android.	43
Figura 19: Distribución versiones Android en el mercado.....	45
Figura 20: Diagrama de bloques del sistema.....	47
Figura 21: Circuito de carga y alimentación del dispositivo.	48
Figura 22: Conexión microcontrolador MCF51QE128	50
Figura 23: Programador de bajo volumen de Pemicro®.....	50
Figura 24: Imagen tarjeta parte trasera con los dispositivos.	53
Figura 25: Vector fuerza del acelerómetro en 3 ejes.	57
Figura 26: Proyección del vector R en 2 ejes del giróscopo	59

Figura 27: Inicialización de los módulos IIC y SCI del microcontrolador	60
Figura 28: Diagrama de bloques de la aplicación móvil.....	62
Figura 29: Ícono de la aplicación móvil.....	63
Figura 30: Pantalla principal de la aplicación móvil.....	64
Figura 31: Menú Articulaciones en la Aplicación	65
Figura 32: Menú Terapias en la Aplicación	66
Figura 33: Menú Instrucciones en la Aplicación	67
Figura 34: Menú Medición en la Aplicación.....	68
Figura 35: Código QR para descargar aplicación.....	69
Figura 36: Circuito de conexión acelerómetro ADXL345 ...	¡Error! Marcador no definido.
Figura 37: Circuito de conexión Giróscopo ITG3200	¡Error! Marcador no definido.
Figura 38: Circuito impreso de sensores cinemáticos.....	¡Error! Marcador no definido.
Figura 39: Circuito de conexión Bluetooth RN 42.....	¡Error! Marcador no definido.
Figura 40: Capa frontal Board física.....	¡Error! Marcador no definido.
Figura 41: Capa trasera Board física.....	¡Error! Marcador no definido.
Figura 42: Diagrama de flujo del Software	¡Error! Marcador no definido.

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1: Valores en grados de los ángulos de las articulaciones superiores.	27
Tabla 2: Valores en grados de los ángulos de las articulaciones inferiores.	28
Tabla 3: Direcciones de los sensores cinemáticos	33
Tabla 4: Asignación de pines módulo RN42.....	42
Tabla 5: Registros de los sensores cinemáticos.....	56

LISTA DE ANEXOS

Pág.

Anexo 1: Comandos at para configurar el módulo rn42	¡Error! Marcador no definido.
Anexo 2: Circuito y montaje de los sensores cinemáticos ...	¡Error! Marcador no definido.
Anexo 3: Montaje del módulo bluetooth rn 41	¡Error! Marcador no definido.
Anexo 4: Board del prototipo del goniómetro	¡Error! Marcador no definido.
Anexo 5: Diagrama de flujo del software	¡Error! Marcador no definido.
Anexo 6: Manual de usuario de la aplicación para android .	¡Error! Marcador no definido.
Anexo 7: Funciones del programa para comunicación bluetooth	¡Error! Marcador no definido.
Anexo 8: Código del programa del goniómetro digital	¡Error! Marcador no definido.
Anexo 9: Funciones del programa para la configuración iic	¡Error! Marcador no definido.

GLOSARIO

- Goniometría:

Es el nombre por el que se conoce a la ciencia y técnica de la medición de ángulos y, por ende, de su construcción o trazado.

- Goniómetro :

Es un instrumento de medición con forma de semicírculo o círculo graduado en 180° o 360°, utilizado para medir o construir ángulos. Este instrumento permite medir ángulos entre dos objetos.

- Acelerómetro:

Es un dispositivo electrónico que permite medir la aceleración en una, dos o tres dimensiones

- Aducción :

Movimiento por el cual se acerca un miembro u otro órgano al plano medio que divide imaginariamente el cuerpo en dos partes simétricas.

- Articulación :

Es la unión entre dos o más huesos próximos. La parte de la anatomía que se encarga del estudio de las articulaciones es la artrología. Las funciones más importantes de las articulaciones son de constituir puntos de unión del esqueleto y producir movimientos mecánicos, proporcionándole elasticidad y plasticidad al cuerpo, además de ser lugares de crecimiento.

- Bluetooth:

Es una especificación industrial para Redes Inalámbricas de Área Personal (WPANs) que posibilita la transmisión de voz y datos entre diferentes dispositivos mediante un enlace por radiofrecuencia en la banda ISM de los 2,4 GHz, bajo el estándar IEEE 802.15.1.

- Dorsiflexión:

Es el movimiento que reduce el ángulo entre el pie y la pierna en el cual los dedos del pie se acercan a la espinilla. El movimiento opuesto se llama flexión plantar. Ocurre en el tobillo. El rango de movimiento de la dorsiflexión indicado en la literatura es de 20° a 30°.

- Extensión:

Es un movimiento de separación entre huesos o partes del cuerpo, en dirección anteroposterior. Es lo opuesto a la flexión. Por ejemplo, el alejamiento del antebrazo y brazo, alineándolos. Los músculos que causan extensiones son músculos extensores. En el ejemplo anterior, el tríceps braquial.

- Flexión:

Es el movimiento por el cual los huesos u otras partes del cuerpo se aproximan entre sí en dirección anteroposterior, paralela al plano sagital. La flexión es consecuencia de la contracción de uno o más músculos flexores. El movimiento opuesto a la flexión es la extensión.

- Giróscopo:

Dispositivo electrónico que detecta los cambios del eje de rotación causados por alguna fuerza que actúe sobre él.

- Pronación:

El término pronación puede hacer referencia a dos movimientos propios de los huesos del ser humano. Se denomina pronación a la rotación del antebrazo que permite situar la mano con el dorso hacia arriba. El movimiento contrario se denomina supinación.

- Supinación:

La supinación es la acción o movimiento por el cual el cuerpo humano o alguna de sus partes es colocada en posición de supino (decúbito supino). Así, la "supinación de la palma de la mano", implica el movimiento del antebrazo y mano para que la palma quede mirando "hacia arriba".

- Ortesis:

Es un apoyo u otro dispositivo externo aplicado al cuerpo para modificar los aspectos funcionales o estructurales del sistema neuromusculoesquelético. Se diferencian de las prótesis al no sustituir un órgano o miembro con incapacidad física, invalidez o disimetría, o parte del mismo, sino reemplazar o reforzar, parcial o totalmente sus funciones.

- Gravedad:

Fuerza física que ejerce la Tierra sobre todos los cuerpos hacia su centro. También se trata de la fuerza de atracción de los cuerpos en razón de su masa.

INTRODUCCIÓN

En el Grupo de Investigación en Bioingeniería de la UPB se ha venido trabajando en el desarrollo de aplicaciones para el análisis de movimientos basado en sensores cinemáticos. Estas aplicaciones se han desarrollado dentro de la línea de investigación en biomécanica de este grupo. Uno de los dispositivos que se requiere desarrollar es un goniómetro digital, que permita la medición de movimientos angulares y la medición de ángulos de flexión, extensión, pronación y supinación de segmentos corporales, esto con el fin de usarlo en un sistema de análisis de movimiento.

Este proyecto parte de esa idea del grupo de investigación y bajo la modalidad de asistencia a la investigación, se busca diseñar y desarrollar un prototipo de goniómetro digital en tiempo real, implementado con acelerómetros y giróscopos donde podamos medir el ángulo de flexión y extensión de las extremidades del cuerpo humano en la rehabilitación de las personas que han sufrido algún tipo de traumatismo.

Por medio de una comunicación inalámbrica se envían cada una de las señales monitoreadas en cada paciente a un dispositivo móvil donde se puede visualizar la evolución del paciente, y éste podrá llevar un control de la evolución de sus terapias de una forma práctica segura y sencilla.

Además la aplicación móvil ilustra al usuario una serie de parámetros establecidos en los manuales de la goniometría médica con los rangos óptimos del movimiento de cada una de las extremidades tratadas en su rehabilitación.

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

Diseñar y desarrollar un prototipo de un goniómetro inalámbrico de tiempo real usando sensores cinemáticos.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Diseño y desarrollo de tarjeta electrónica para la adquisición y procesamiento de los datos de los acelerómetros y los giróscopos.
- Implementación de un sistema de comunicación inalámbrica para la transmisión de los datos a un dispositivo móvil.
- Desarrollo de un software para visualizar las señales y el resultado del procesamiento de los datos en un dispositivo móvil.

1. MARCO TEÓRICO

La goniometría es el nombre por el que se conoce a la ciencia y técnica de la medición de ángulos, así como su construcción o trazado.

A través de la historia, la lenta y costosa evolución del goniómetro ha estado muy ligada a la tecnología, debido a su gran número de aplicaciones tanto a nivel civil, de comunicaciones, industrial, militar y marítimo; interpretando los datos obtenidos y aplicando simples operaciones matemáticas para formar figuras geométricas y resolver todas las incógnitas que en ellas pueden aparecer.

Remontándonos alrededor del año 3000 a. de C. los babilonios y egipcios utilizaban ya cuerdas y cadenas para la medición de distancias. Hasta el 560 a.c. no se tienen referencias de nueva instrumentación hasta que Anaximando introdujo el "Gnomon" [1], el cual hace referencia a un objeto alargado cuya sombra se proyectaba sobre una escala graduada para medir el paso del tiempo. Otras representaciones de gnomones son los obeliscos de la Plaza de la Concordia en París, de la Plaza de San Pedro en Roma y del Hipódromo de Constantinopla. Entre los primeros usuarios de este nuevo instrumento encontramos a Metón y Eratóstenes para la determinación de la dirección Norte y la circunferencia de la tierra, respectivamente.



Figura 1: Gnomon.

(FUENTE:http://astronomia2009.es/Proyectos_de_ambito_nacional/La_medida_del_Radio_de_la_Tierra/Documentacion:_Que_es_un_gnomon.html)

La goniometría es la ciencia que estudia los grados de libertad de movimiento de cada eslabón en cada plano del espacio: se mide con un aparato denominado goniómetro y se valoriza en grados (los movimientos son alrededor de un eje, se consideran circulares y se miden en una escala de 0 a 360°).

En astronomía, muchas distancias y dimensiones se deducen a través de la medición de ángulos. El ángulo formado por dos visuales tangentes a los bordes opuestos de un planeta o de una galaxia permite calcular su diámetro. Asimismo, el ángulo que separa los dos componentes de una estrella doble indica la distancia angular que media entre ambos. Los oculares de los telescopios están provistos de micrómetros que permiten centrar la imagen o bien medir la distancia angular que separa dos puntos de ésta. Las distancias angulares pueden ser medidas respecto a una estrella fundamental, astro cuyas coordenadas son conocidas con una gran precisión.

En mineralogía, la medición de los ángulos de las estructuras cristalinas de los minerales, permite definir los sistemas y clases de cristalización e identificar los cristales.

La base de toda la geodesia o división geográfica de la tierra, es la triangulación del territorio y cualesquiera sean los métodos adoptados, siempre representa en ellos un importante papel la medición de ángulos. La mayor parte de las mediciones geodésicas se aplica en la superficie terrestre, donde, para fines de determinaciones planimétricas, son marcados puntos de una red de triangulación.

En biomecánica es de gran importancia poder reproducir la movilidad articular del sujeto de estudio a partir de los datos obtenidos por la goniometría. Se aplica para la fabricación y diseño de instrumental quirúrgico, de prótesis y de ortesis¹.

La goniometría se aplica en la gimnasia rítmica para la selección de deportistas de alto rendimiento y alta flexibilidad de acuerdo a las reglas de flexibilidad máxima, con los que se puede escoger a los mejores gimnastas [2].

La goniometría aplicada a las ciencias médicas es la técnica de medición de los ángulos creados por la intersección de los ejes longitudinales de los huesos a nivel de las articulaciones [3]. Es una técnica muy utilizada en Kinesiología Humana para evaluar ángulos articulares.

Se han realizado investigaciones a nivel médico utilizando sensores cinemáticos para la medición de ángulos en movimientos humanos. En un estudio se evaluó en la funcionalidad del hombro mediante acelerómetros y giróscopos cinemáticos 3D situando sensores en diferentes partes del cuerpo donde está comprometida la rotación del hombro, con un módulo miniatura el cual comprendía un giróscopo y tres acelerómetros miniatura. Los sensores miden la elevación anterior-extensión, abducción-aducción y rotación interna-externa del hombro. Con los acelerómetros miden la componente de la gravedad, haciendo posible obtener la orientación del objeto cuando está inmóvil. Los ángulos en 3D se obtuvieron después de la integración de las tres velocidades angulares [4].

Para tener un control en pacientes con riesgo de lesiones y/o simplemente optimizar la capacidad

¹ Ortesis: Es un apoyo u otro dispositivo externo aplicado al cuerpo para modificar los aspectos funcionales o estructurales del sistema neuromusculoesquelético.

de movimiento de alguna extremidad del cuerpo humano, el grupo de investigación del área de bioingeniería de la Universidad Pontificia Bolivariana desarrolló un dispositivo capaz de medir la aceleración y velocidad angular de algún movimiento asociado al cuerpo humano, usando sensores cinemáticos como acelerómetros y giróscopos recibiendo datos de forma inalámbrica para su posterior análisis. Los datos obtenidos con el acelerómetro contienen información de la aceleración dinámica y estática. La aceleración estática es aquella producida por la gravedad y puede proporcionar información de los ángulos de inclinación. La aceleración dinámica es aquella debida al movimiento con la cual, mediante operaciones matemáticas se puede llegar a calcular la velocidad y posición lineal [5].

En la literatura se reportan investigaciones en las cuales los goniómetros juegan un importante rol en cada una de las aplicaciones. Una de las nuevas tecnologías utilizadas en los goniómetros es propuesta por investigaciones realizadas por la Universidad Pontificia de Cataluña, la cual trabajó con goniómetros de tecnología láser para el posicionamiento guiado en un robot móvil. La tarea de ellos es calcular la posición y la orientación de un robot móvil o vehículos autoguiados (AGV), la cual se hace con un constante monitoreo en tiempo real de cada uno de los ángulos captados por el goniómetro y los reflectores.

El goniómetro está compuesto de un sistema de posicionamiento láser rotativo de estator fijo al bastidor del robot y un conjunto de reflectores catadiópticos distribuidos por el entorno. El cabezal emite un haz que barre horizontalmente el entorno y se refleja cuando incide en un reflector y un encoder incremental mide el ángulo del haz láser relativo al bastidor [6].

Para que una medición articular sea correcta en su valoración, es necesario conocer las posibilidades normales de cada articulación en los tres planos del espacio, utilizar un sistema de medida comparable, y tomar unas precisas y confiables con un adecuado instrumento de medición, como lo es el Goniómetro.

El movimiento humano es uno de los fenómenos más complejos de la naturaleza. A través del movimiento el hombre ha modificado su ambiente y a sí mismo (el propio organismo y la mente). Debido a esto, han surgido ciencias relativamente recientes como la kinesiología y la

biomecánica, orientadas al estudio del movimiento humano. Es allí donde entra la goniometría como técnica utilizada para la evaluación de ángulos articulares. Son numerosas las lesiones como esguinces, luxaciones o fracturas; que conllevan luego a una posterior rehabilitación de los músculos y articulaciones afectadas. Por lo anterior, es necesario llevar un registro de la movilidad de dichas articulaciones en cada sesión de las terapias, para así evaluar su progreso y tomar las determinaciones necesarias para lograr un mejor resultado.



Figura 2: Goniómetro De Regletas. (Fuente <http://www.quirumed.com/es/Catalogo/articulo/53702>)

1.1 OBJETIVOS DE LA GONIOMETRÍA EN MEDICINA

1. Evaluar la posición de una articulación en el espacio. En este caso, se trata de un procedimiento estático que se utiliza para objetivizar y cuantificar la ausencia de movilidad de una articulación.

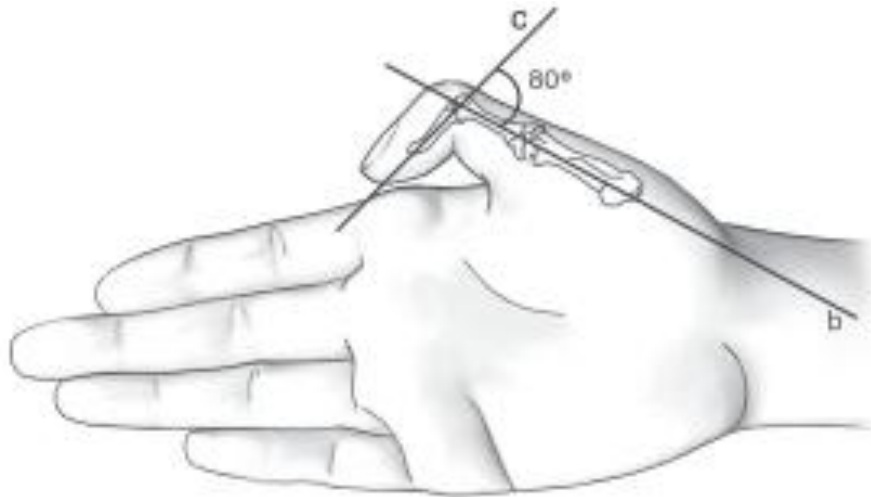


Figura 3: Medición estática de la posición de una articulación en el espacio.

(FUENTE: Claudio H. Taobadela. Goniometría.)

2. Evaluar el arco de movimiento de una articulación en cada uno de los tres planos del espacio. En este caso, se trata de un procedimiento dinámico que se utiliza para objetivizar y cuantificar la movilidad de una articulación.

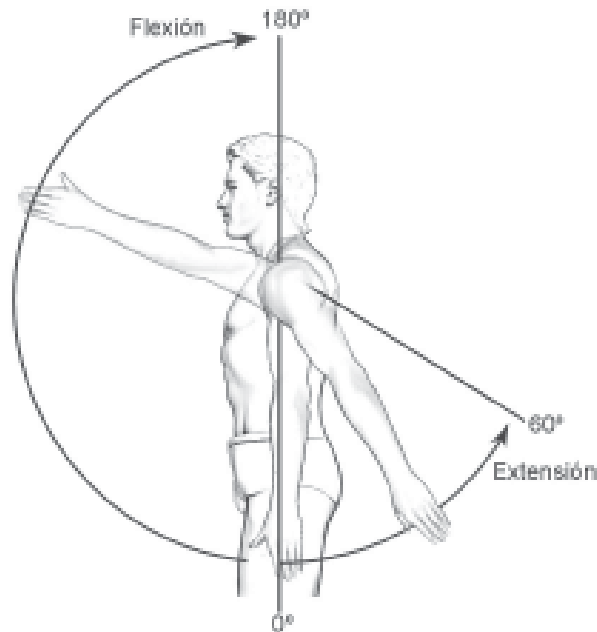


Figura 4: Medición dinámica del arco de movimiento de una articulación.

(FUENTE: Claudio H. Taobadela. Goniometría.)

1.2 APLICACIONES DE LA GONIOMETRÍA EN LA SALUD

En la salud, la goniometría puede ser usada en:

- Rehabilitación: para determinar el punto de inicio del tratamiento, evaluar su progresión en el tiempo, evaluar los tratamientos y determinar posibles secuelas.
- Medicina del deporte: para medir y controlar la evolución del entrenamiento de los deportistas.
- Administración en salud y en epidemiología: el registro goniométrico facilita la revisión e interpretación de datos en las historias clínicas.
- Medicina legal y medicina del trabajo: para la evaluación de incapacidades producto de secuelas de accidentes o enfermedades que afectan el sistema osteoarticular.

1.3 PLANIMETRÍA DEL CUERPO HUMANO

También es conocida como nomenclatura de orientación. Se entiende por plano aquella superficie que atraviesa o limita el cuerpo en un determinado sentido, por lo tanto la planimetría es la medición de estos planos en el cuerpo humano.

El objetivo de ésta es proporcionar las directrices necesarias para ubicar en el espacio los elementos anatómicos en posiciones y orientaciones convencionales valiéndose de líneas, planos y puntos.

Hay un punto de partida universalmente aceptado desde el cual parten todos los movimientos, y es la posición anatómica en la cual todas las articulaciones se consideran en posición neutral o a cero grados. El cuerpo debe estar erecto (de pie), al igual que la cabeza y cuello, mirando al frente, hacia adelante, con los brazos extendidos hacia abajo, a cada lado del cuerpo, con las palmas de las manos dando hacia adelante (antebrazos en supinación), las puntas de los dedos mirando al frente, las piernas extendidas y levemente separadas (en abducción), y los tobillos y pies igualmente extendidos (de puntillas, con la punta del pie señalando hacia el frente). En relación a la cara, ésta queda mirando al frente.



Figura 5: Posición anatómica del cuerpo humano. (FUENTE: http://elrincondelaquiropractica.blogspot.com/2010_12_01_archive.html)

Existen términos de orientación que son parte de la Planimetría humana:

Superior o craneal: hacia el extremo cefálico del cuerpo

Inferior o caudal: alejado de la cabeza.

Anterior o ventral: Situado por delante.

Posterior o dorsal: Detrás.

Medial: hacia la línea media del cuerpo.

Lateral: externo, lejos de la línea media del cuerpo.

Proximal: En dirección o más cercano al tronco o al sitio de origen.

Distal: lejos lo más alejado del tronco.

1.3.1 PLANO CORONAL O FRONTAL

El plano frontal o coronal es cualquiera de los planos perpendiculares a los planos sagital y vertical que dividen al cuerpo en dos partes, una anterior y otra posterior. Lo cruza perpendicularmente el eje anteroposterior sobre el cual se producen los movimientos de abducción y aducción, visibles en la persona de frente.

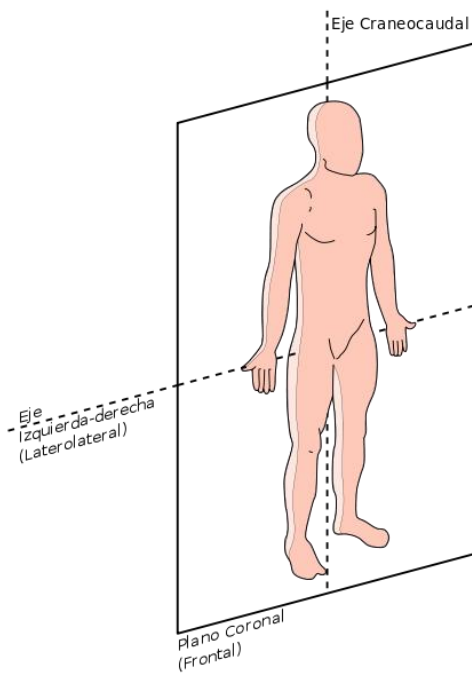


Figura 6: Plano anatómico coronal o frontal.

(FUENTE:http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Plano_anatomico_Transversal.svg?uselang=es)

- **Abducción**

Es todo movimiento en el plano frontal que aleja una parte del cuerpo de la línea media.

- **Aducción**

Es todo movimiento que en el plano frontal acerca una parte del cuerpo a la línea media.

1.3.2 PLANO SAGITAL

También es llamado plano Anteroposterior. Este plano divide al cuerpo en dos mitades: una derecha, y la otra, izquierda. Todos los planos paralelos al plano sagital medio se denominan planos sagitales o parasagitales.

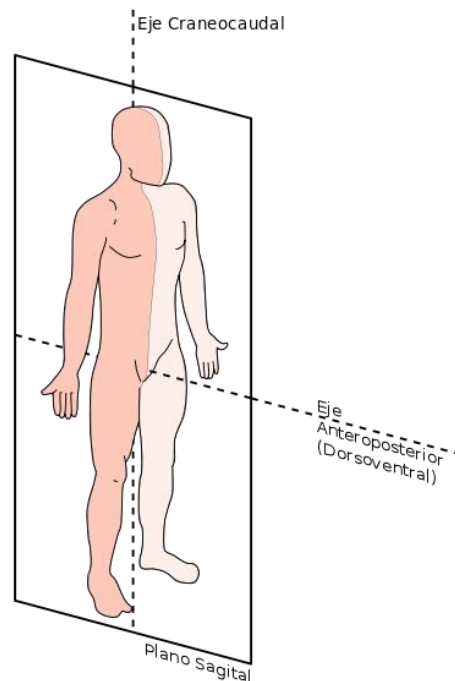


Figura 7: Plano anatómico Sagital.

(FUENTE: http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Plano_anatomico_Sagital.svg?uselang=es)

Los movimientos fundamentales sobre este plano son flexión y extensión.

- **Flexión**

Se define como el decrecimiento del ángulo formado por los huesos de una articulación.

- **Extensión**

Está definida como el incremento del ángulo formado por los huesos de una articulación.

1.3.3 PLANO TRANSVERSAL

Llamado también plano Horizontal, es cualquiera de los planos perpendiculares a los planos sagital y coronal que dividen al cuerpo en dos partes: una craneal o superior y otra caudal o inferior. Lo cruza perpendicularmente el eje vertical, sobre el cual se producen los movimientos de rotación que son vistos desde arriba o desde abajo.

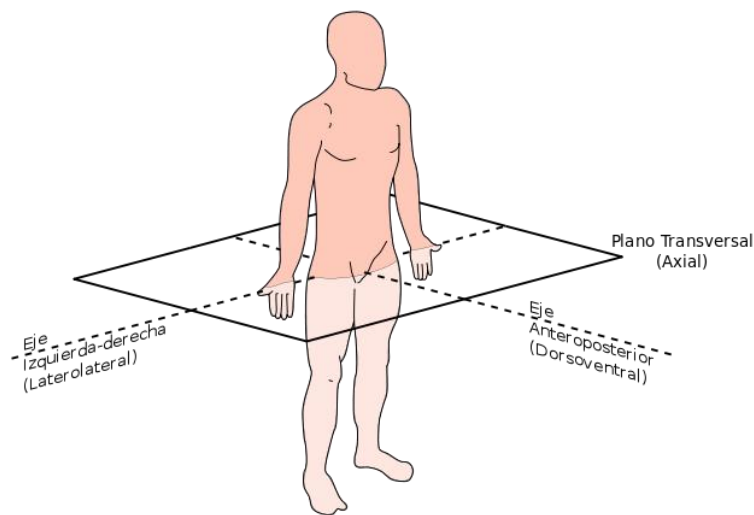


Figura 8: Plano anatómico Transversal.

(FUENTE: http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Plano_anatomico_Transversal.svg?uselang=es)

Sobre el plano horizontal, los movimientos fundamentales son de rotación. [7]

1.4 VALORES PROMEDIO DEL MOVIMIENTO ARTICULAR

1.4.1 GONIOMETRÍA DE LOS MIEMBROS SUPERIORES

HOMBRO	
Abducción	180°
Flexión	180°
Extensión	50°
Rotación interna	80°
Rotación externa	90°
CODO	
Flexión	150°
Extensión	0°
ANTEBRAZO	
Pronación	85°
Supinación	90°
MUÑECA	
Flexión	75°
Extensión	70°
Abducción	40°
Aducción	20°

Tabla 1: Valores en grados de los ángulos de las articulaciones superiores.

(FUENTE: Valoración de la Movilidad del Sistema Articular. Dr. José Ojeda Gil. 2005)

1.4.2 GONIOMETRÍA DE LOS MIEMBROS INFERIORES

RODILLA	
Flexión	140°
Extensión	0°
TOBILLO Y PIE	
Dorsiflexión	30°
Flexión plantar	50°
Inversión	30°
Extensión	15°

Tabla 2: Valores en grados de los ángulos de las articulaciones inferiores.

(FUENTE: Valoración de la Movilidad del Sistema Articular. Dr. José Ojeda Gil. 2005)

Al momento de hacer las valoraciones de los movimientos articulares que se encuentran en evaluación, se deben comparar las mediciones, de ser posible, con la articulación que no ha sido afectada para controlar su evolución. De no ser posible, se debe recurrir a la literatura médica. Se dice que si el déficit articular de un paciente es superior al 50%, según su labor profesional, es candidato a una incapacidad parcial. A su vez, si su déficit articular supera el 80%, puede ser candidato a una incapacidad total dependiendo de la labor profesional que desempeñe [8].

2. DISPOSITIVOS Y HERRAMIENTAS

Para la elaboración del prototipo del goniómetro digital, se emplearon los siguientes dispositivos y sensores cinemáticos:

2.1 MICROCONTROLADOR MCF51QE128

El MCF51QE128 pertenece a la familia de microcontroladores COLDFIRE de 32 bits. Soporta hasta 30 solicitudes de interrupción periféricas y siete interrupciones de software. Puede ser programado mediante varios lenguajes de programación como lo son Assembler, C/C++ y Basic. Cuenta con diferentes fuentes de reloj configurables para definir la velocidad deseada por el usuario. También posee detección de baja tensión con puesta a cero o interrupción con alarmas de caída de tensión fuera del rango de funcionamiento normal.

Los microcontroladores siempre están diseñados bajo esquemas estandarizados de arquitecturas con base en módulos, los cuales prestan servicios adicionales para manipular y procesar la información que se entregará al microcontrolador y/o la información que será obtenida de éste y entregada a cada uno de los periféricos que transmiten la información procesada.

Los principales módulos de este microcontrolador son:

- ADC (Analog-to-Digital Converter) 24 canales para comparación Análoga-Digital con una resolución máxima de 12 bits.
- ACMP (Analog Comparator Module) 2 comparadores análogos programables con atención a interrupción. Proporciona un circuito para comparar dos tensiones de entrada analógicas o para comparar una tensión de entrada analógica a una tensión de referencia interna.

- SCI (Serial Communication Interface) 2 Interfaces de Comunicación Serial para comunicación Full-Duplex.
- SPI (Serial Peripheral Interface) 2 Interfaces Periféricos Seriales con comunicación simplex y Full-Duplex.
- IIC (Inter-Integrated Communication)



Figura 9: Microcontrolador MCF51QE128

(Fuente: http://www.freescale.com.cn/Products/8BitMCU/MC9S08QE_Overview.asp)

2.1.1 MÓDULOS EMPLEADOS:

- **MÓDULO IIC (Inter-Integrated Circuit)**

Sistema de comunicaciones desarrollado por Philips como un sistema multi-maestro, para la conexión de periféricos a distancias relativamente cortas y velocidades de unos cientos de Kbps. El protocolo se implementa sobre dos líneas, una línea de clock de sincronismo (SCL: Serial Clock) y otra para los datos (SDA: Serial Data). Como los datos se transmiten por una sola línea, el sistema es bidireccional del tipo maestro/esclavo.

Las Líneas de Clock SCL y de Datos SDA son manejadas por el master durante una comunicación típica.

La siguiente figura muestra una trama, para la transmisión de datos en 8 bits (también existe en 10 bits). En la trama se puede apreciar que el protocolo requiere una condición de inicio, seguido por los bits de datos, después se presenta un bit para la señal de reconocimiento (ACK) y finalmente la condición de stop.

En un Bus IIC típico cada esclavo tiene asignada una dirección de entre 7 y 10 bits que se usa

para seleccionar el esclavo con el que se desea entablar una comunicación.

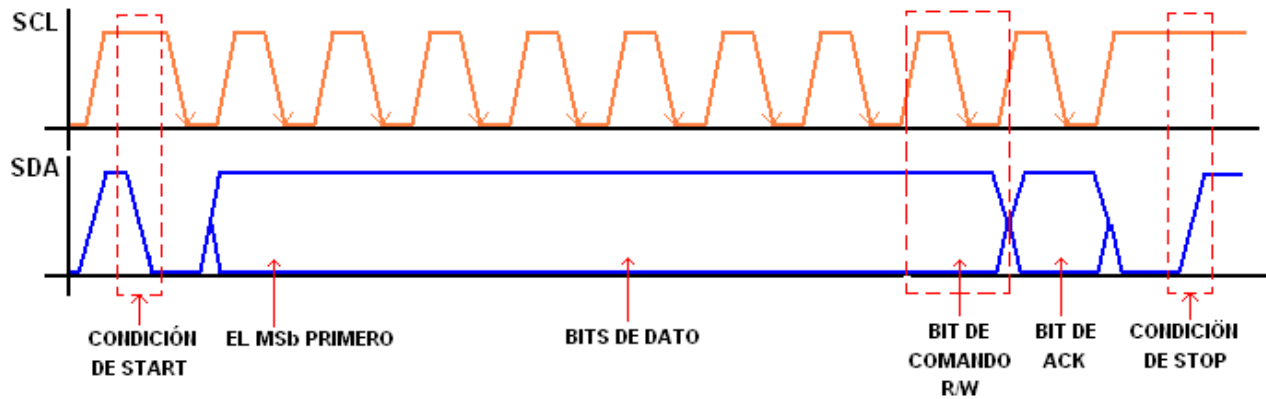


Figura 10: Representación de la trama de una transmisión IIC

Las partes que conforman este protocolo son:

- ✓ **Condición de *start*:** Es válida cuando estando la señal de SCL en estado alto, se presenta un flanco de bajada de la señal de SDA.
- ✓ **Bits de dato:** Luego de haberse dado la condición de *start*, los bits de datos comienzan a aparecer (el msb primero), sincronizados con el flanco descendente de la señal de SCL.
- ✓ **Bit de comando (R/W):** Cuando se está direccionando el dispositivo con el cual se va a establecer una comunicación IIC, este bit no pertenece al dato como tal, sino a la acción de escritura o lectura sobre el dispositivo (Lectura (R) = nivel alto y Escritura (W) = nivel bajo).
- ✓ **Bit de reconocimiento (ACK = Acknowledge):** Este bit es verdadero en estado bajo y lo envía quien recibe el dato.
- ✓ **Condición de *stop*:** Es válida cuando estando la señal de SCL en estado alto, se presenta un flanco de subida de la señal de SDA [9].

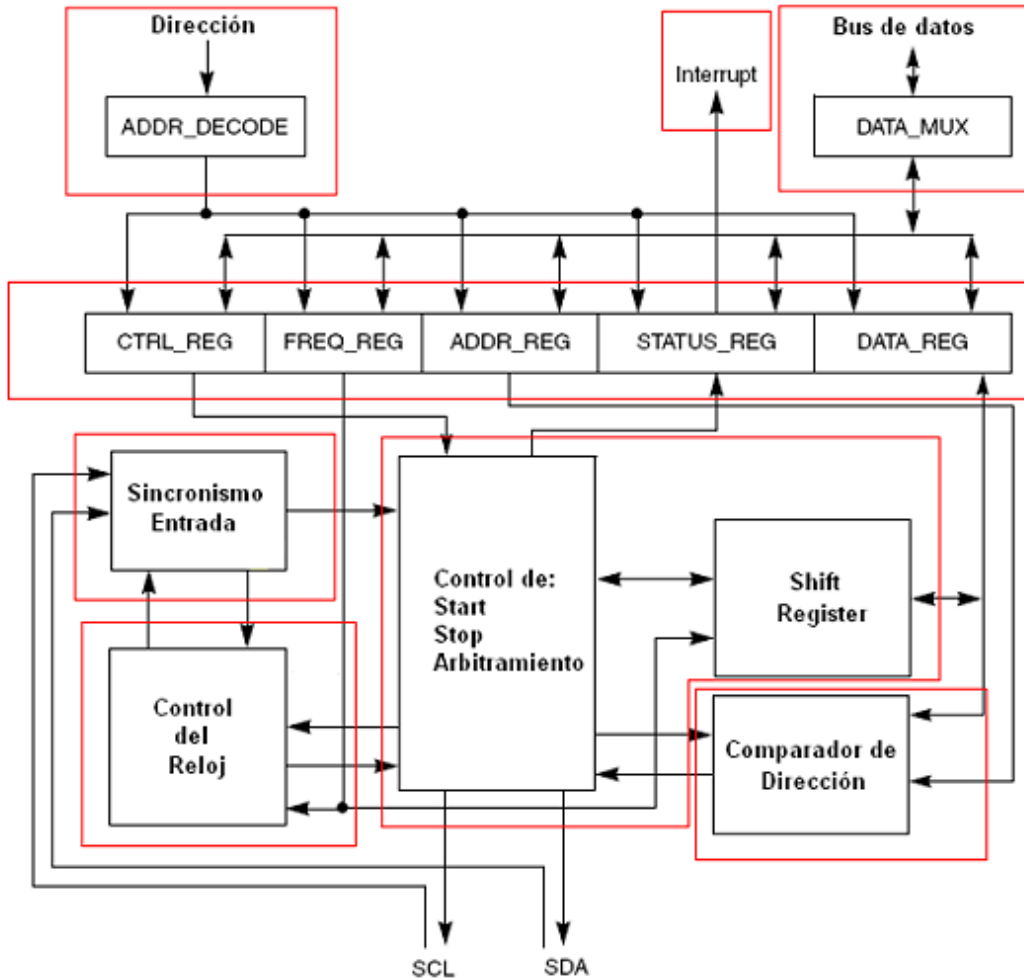


Figura 11: Diagrama de bloques módulo IIC.

(FUENTE: MCF51JM128 ColdFire® Integrated Microcontroller Reference Manual)

Se debe iniciar la comunicación generando un START, que es producir un flanco de bajada del SDA mientras el SCL está en un nivel lógico alto. Al mismo tiempo en el SCL se transmite la señal del reloj que sincronizará el tiempo de envío de los bytes por el SDA de los dispositivos, de forma que se puedan leer correctamente los datos del SDA cuando el SCL cambia del nivel bajo al nivel alto (lectura en el flanco de subida).

Luego se envía la dirección del sensor, más un bit en 0 para indicar escritura.

ACELERÓMETROS	
Dirección lectura	0xA1
Dirección escritura	0xA0
GIRÓSCOPOS	
Dirección lectura	0b1101001
Dirección escritura	0b1101000

Tabla 3: Direcciones de los sensores cinemáticos

Se genera un acknowledge (ACK) para indicar que la dirección fue enviada correctamente y luego se escribe la dirección del registro que se va a leer como lo son las mostradas en la tabla 3. A continuación se genera nuevamente un START y se envía la dirección del registro del sensor en modo lectura. Luego se espera el ACK y se genera una condición de STOP para finalizar la comunicación con ese sensor. Esto se logra generando un flanco de subida del SDA mientras el SCL se encuentra en alto.

Esto se repite para cada uno de los registros de los sensores hasta obtener los 12 valores con los que se obtienen los datos de X, Y y Z tanto para los acelerómetros como para los giróscopos.

- **MÓDULO SCI (Serial Communication Interface)**

Este módulo del MCF51QE128 permite realizar comunicación asíncrona de alta velocidad con diversos periféricos y otros microcontroladores. Modo de operación Full-Duplex donde la información puede ser transmitida y recibida simultáneamente, aprovechando al máximo el canal de comunicación. Este Microcontrolador tiene dos puertos seriales, el SCI1 y el SCI2.

- El Transmisor y el Receptor son habilitados independientemente.
- Se selecciona la longitud de datos en 8 o 9 bits.

- Rata de bits por segundo programable.
- Solicitudes de interrupción separadas del receptor y el transmisor.

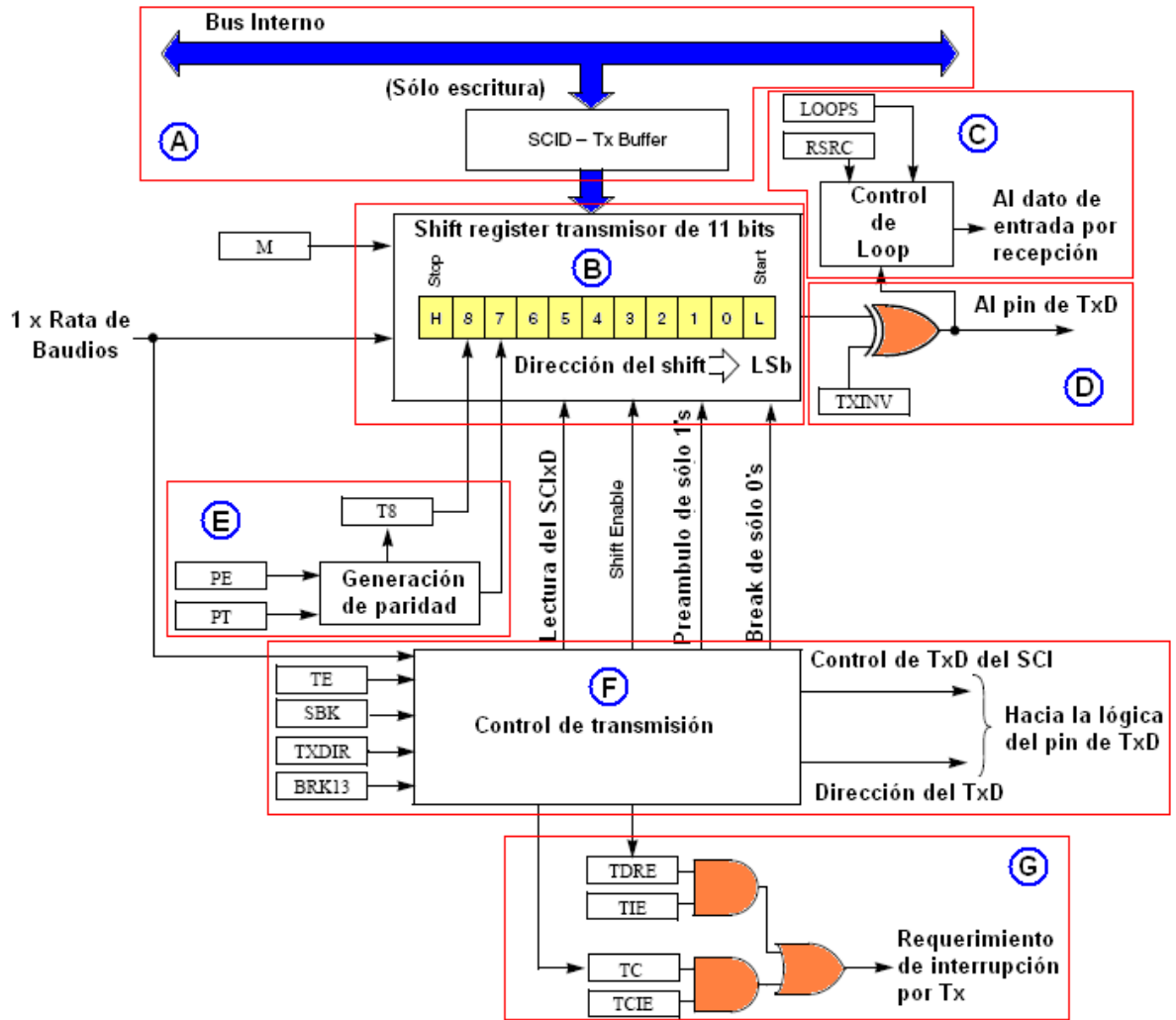


Figura 12: Diagrama de bloques Transmisión SCI.

(FUENTE: MCF51JM128 ColdFire® Integrated Microcontroller Reference Manual)

- Operación del módulo controlada por interrupciones, con 8 banderas de interrupción: □
- Transmisor vacío
- Transmisión completa
- Receptor lleno
- Entrada del receptor sin utilizar
- Sobreescritura del receptor

- Error de ruido
- Error de estructura del dato
- Error de paridad

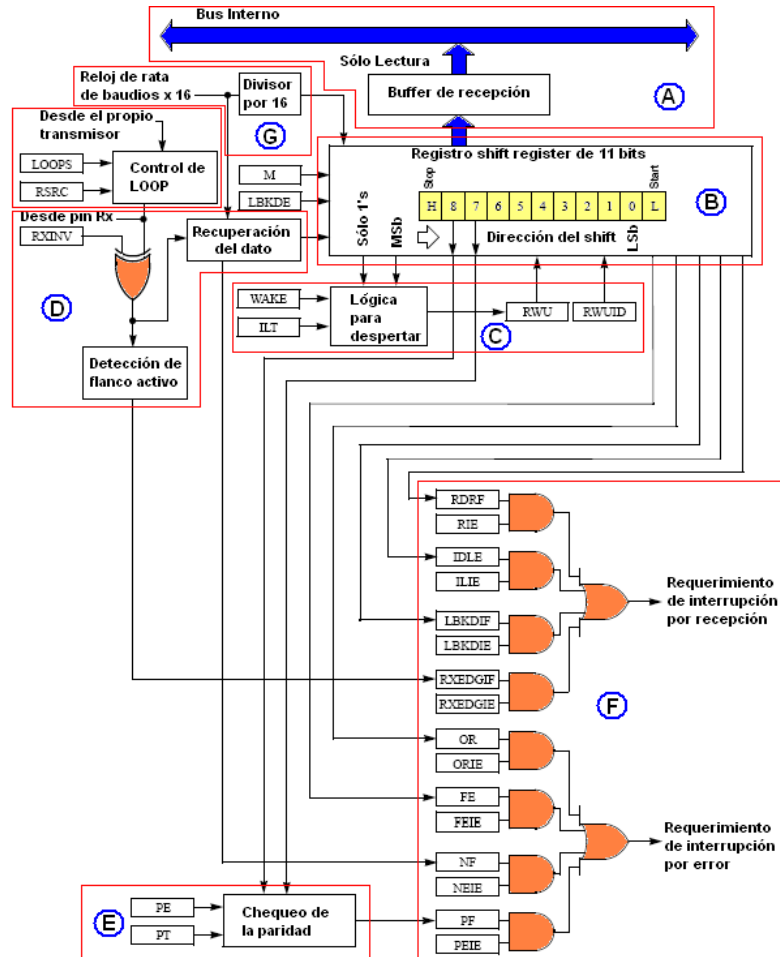


Figura 13: Diagrama de bloques Recepción SCI.

(FUENTE: MCF51JM128 ColdFire® Integrated Microcontroller Reference Manual)

Los Registros del SCI son de 8-bits. Cada registro tiene características para la configuración del puerto serial dependiendo de cómo se desea trabajar con él.

2.2 ACELERÓMETROS

Son dispositivos electrónicos que permiten medir la aceleración en una, dos o tres dimensiones. Esta característica permite medir la inclinación de un cuerpo, puesto que es posible determinar la componente de la aceleración provocada por la gravedad que actúa sobre el cuerpo. Cuando se comprime un retículo cristalino piezoeléctrico, se produce una carga eléctrica proporcional a la fuerza aplicada.

Para el prototipo del goniómetro digital se emplearon acelerómetros ADXL 345 de tres ejes con una alta resolución de medición de hasta $\pm 16g$

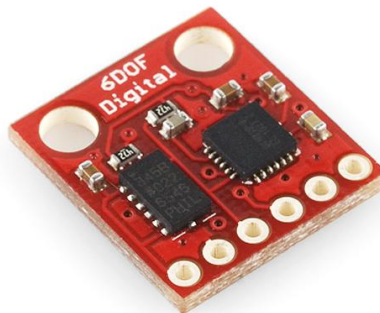


Figura 14: Módulo de acelerómetro ADXL345 y Giróscopo ITG3200

(Fuente: <http://www.sparkfun.com/products/10121>)

Características

- Consumo de 40 mA en modo de medición y 0,1 mA en modo de espera.
- Monitoreo actividad / inactividad
- Detección de caída libre

- Rango de tensión de alimentación 2,0 V a 3,6 V
- Interfaces digitales SPI (3 - y 4 hilos) y I2C
- Amplio rango de temperatura (-40 ° C a +85 ° C)
- Pequeño y delgado: 3 mm x 5 mm x 1 mm paquete LGA

El ADXL345 es un pequeño acelerómetro de bajo poder, delgado de 3 ejes con una alta resolución (13 bits) de medición de hasta ± 16 g. Los datos digitales de salida tienen el formato como complemento a dos de 16 bits y es accesible a través de SPI (3 - o 4 hilos) o interfaz digital I2C.

Es muy adecuado para aplicaciones de dispositivos móviles. Mide la aceleración de la gravedad estática en aplicaciones para censar inclinación, así como la aceleración dinámica resultante del movimiento o de choque. Su alta resolución (4 mg / LSB) permite la medición de cambios de inclinación menor de $1,0^\circ$ con un rango de medición seleccionable de +/-2, +/-4, +/-8, +/-16 g. [10] .

2.3 GIRÓSCOPOS

Un giróscopo electrónico es un dispositivo que detecta los cambios del eje de rotación causados por alguna fuerza que actúe sobre él. Mide la deformación de un prisma vibrante interno a causa del efecto de Coriolis. Como resultado de esta deformación el giróscopo genera un voltaje de salida que es proporcional a esta velocidad angular de rotación. La posición angular también puede ser obtenida fácilmente a través de una simple integración de la señal del giróscopo. Del mismo modo se puede obtener la aceleración al derivar la señal. Se utiliza para medir la orientación o para mantenerla, por estar basado su funcionamiento en el principio de conservación del momento angular.

Se emplearon dos giróscopos ITG3200 con salida digital de tres ejes para el desarrollo del goniómetro. [11]

El dispositivo se caracteriza por tener tres conversores análogo a digital de 16 BIT (ADC) para digitalizar la salida del giróscopo, un ancho de banda con filtro de paso bajo interno y una interfaz I2C de modo rápido (400kHz).

Como características adicionales podemos mencionar un sensor de temperatura incorporado y un oscilador interno con un 2% de precisión.

El ITG-3200 se puede encender con cualquier tensión entre los 2,1 y los 3,6 V. Para darle flexibilidad al suministro de energía, el dispositivo tiene un pin de referencia VLOGIC (etiquetado como VIO).

- El voltaje VLOGIC puede estar en cualquier lugar con un mínimo de 1,71V y un máximo de VDD. Para uso general el VLOGIC se puede igualar a VCC.
- La corriente normal de funcionamiento del sensor es de solo 6,5mA.
- La comunicación con el ITG-3200 se logra por medio de una interfaz (I2C) de dos cables.
- El sensor también se caracteriza por tener una salida de interrupción y una entrada de reloj opcional.
- Salida digital en 3 ejes con sensores de velocidades angulares [12].
- Encendido en 50 ms.

EL ITG-3200 es el primer chip con salida digital en 3 ejes, el cual dispone de mayor sensibilidad y estabilidad de temperatura. Cuenta con tres conversores análogos a digitales de 16 bits. Tecnología patentada por Nasiri-Fabrication platform.

Alguna de su aplicación en la actualidad es basada en controladores de juegos 3d y mando a distancia, movimiento basado en juegos portátiles, salud y vigilancia [13].

2.4 MÓDULO BLUETOOTH

Tecnología inalámbrica de comunicaciones de corto alcance destinados a sustituir los cables de conexión portátil y/o dispositivos fijos, manteniendo altos niveles de seguridad, baja potencia y bajo costo, bajo el estándar IEEE 802.15.1. Opera en la banda libre (ISM)² de 2.4 Ghz. De acuerdo a su clase puede alcanzar un rango de hasta 100 metros. El más usado es el de clase 2 que tiene un alcance de unos 30m con un consumo de 2.5mW a una velocidad de 3 Mbps.



Figura 15: Marca Registrada Bluetooth.

(Fuente: <http://www.bluetooth.com/English/Pages/Default.aspx>)

Esta tecnología está incluida en prácticamente todos los teléfonos celulares del mercado, por lo que se hace apropiada para este proyecto donde queremos enviar y recibir datos entre nuestro dispositivo y un aplicativo celular.

Para este proyecto emplearemos un módulo Bluetooth RN 42 de Roving Networks pequeño, de baja potencia y económico, que soporta múltiples protocolos de interfaz.

² **ISM (Industrial, Scientific and Medical)** son bandas reservadas internacionalmente para uso no comercial de radiofrecuencia electromagnética en áreas industrial, científica y médica.



Figura 16: Módulo Bluetooth RN42. (Fuente: http://www.rovingnetworks.com/products/RN_42)

Caraterísticas principales

- Dimensiones: 13.4mm x 25.8 mm x 2mm.
- Estándares de Bluetooth soportados: 2.1/2.0/1.2/1.1.
- Voltaje de operación de 3V a 3.6 V.
- Consumo: 26 uA en modo inactivo, 3mA en conexión establecida y 30mA transmitiendo.
- Rango de velocidad para transmisión de datos: 1200bps a 921Kbps. Velocidades distintas a las estándar pueden ser programadas.
- Encriptación para seguridad de transmisión de 128 bits.
- Banda de frecuencia: 2402 ~ 2480MHz.
- Chip de antena RF.
- Máxima distancia de transmisión: 20 m.
- Puerto UART local y USB.
- Auto detección/emparejamiento sin necesidad de configuración por software.
- Configurable en modos: maestro y esclavo.
- Rango de temperatura de -40°C a +85°C .
- Certificaciones: SIG, FCC, ICS, CE.
- Cumple la norma RoHS [14].

Opera entre las frecuencias de 2402 y 2480 MHz. Bluetooth salta de manera pseudo-aleatoria en las 79 frecuencias en la banda ISM (Industrial, Scientific and Medical)³ para adaptarse a las interferencias.

Mediante Comandos AT se inicializó el módulo de acuerdo a las necesidades y preferencias específicas. La dirección MAC del módulo RN42 implementado es: 00:06:66:43:B6:C1

2.4.1 DIAGRAMA DE ASIGNACIÓN DE PINES MÓDULO RN42

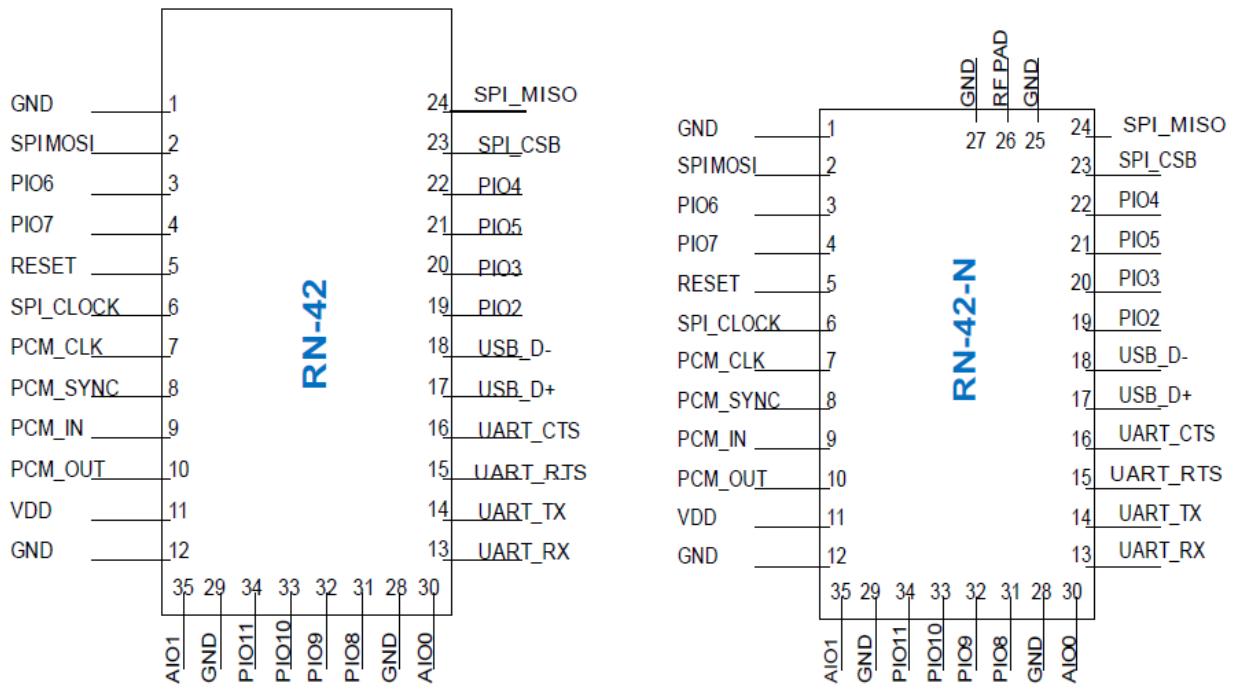


Figura 17: Asignación de pines módulo RN42. (FUENTE: www.rovingnetworks.com)

Al activar el módulo SCI (Serial Communication Interface) del microcontrolador MCF51QE128, se habilitaron los pines PTB0 y PTB1 para transmisión y recepción y se conectaron a los pines 13 y 14 del módulo Bluetooth RN42.

³ ISM (Industrial, Scientific and Medical) son bandas reservadas internacionalmente para uso no comercial de radiofrecuencia electromagnética en áreas industrial, científica y médica.

Se emplearon los siguientes pines del bluetooth RN42:

PIN	NOMBRE	DESCRIPCIÓN
1	GND	
3	PIO6	HIGH=Modo maestro
4	PIO7	HIGH=9600 Baudios, LOW=115200 B
11	VDD	
12	GND	
13	UART_RX	Recepción
14	UART_TX	Transmisión
15	UART_RTS	
16	UART_CTS	
19	PIO2	Led de status. HIGH= Conectado
20	PIO3	Led autodescubrimiento
21	PIO5	Led de status. LOW= Conectado
22	PIO4	Configuración por defecto
25	GND	
27	GND	
28	GND	

Tabla 4: Asignación de pines módulo RN42

2.5 ANDROID

Nuestra aplicación fue desarrollada bajo el sistema operativo de ANDROID, el cual está enfocado para ser utilizado en dispositivos móviles como teléfonos inteligentes, tabletas, etc, y es la plataforma abierta móvil más popular del mundo hasta el día de hoy. De acuerdo a las palabras que Eric Schmidt (presidente ejecutivo y previo CEO de Google) los dispositivos Android activados ascienden a 500 millones. Agregó que en promedio se están activando 1.3 millones de dispositivos diarios con este sistema operativo y se estima que para mediados de 2013 se llegue a la marca de los 1000 millones de dispositivos [15].



Figura 18: Marca registrada Android. (FUENTE: <http://www.ganetec.com/crabstone/android>)

Fue desarrollado inicialmente por ANDROID INC⁴, una firma comprada por GOOGLE en el año 2005. Google creó en el año 2007 una organización llamada “OPEN HANDSET ALLIANCE” que es una alianza comercial de 84 compañías que se dedica a desarrollar estándares abiertos para dispositivos móviles. Algunos de sus miembros son Google, HTC, Dell, Intel, Motorola,

⁴ Compañía de software ubicada en Palo Alto, California. Desarrolló durante sus inicios Android, un sistema operativo basado en Linux y orientado a dispositivos móviles, como teléfonos inteligentes y tablets.

Qualcomm, Texas Instruments, Samsung, LG, T-Mobile, Nvidia y Wind River Systems. Google liberó la mayoría del código de Android bajo la licencia Apache, una licencia libre y de código abierto.

La estructura del sistema operativo Android se compone de aplicaciones que se ejecutan en un framework Java de aplicaciones orientadas a objetos sobre el núcleo de las bibliotecas de Java en una máquina virtual Dalvik con compilación en tiempo de ejecución. Las bibliotecas escritas en lenguaje C incluyen un administrador de interfaz gráfica (surface manager), un framework OpenCore, una base de datos relacional SQLite, una Interfaz de programación de API gráfica OpenGL ES 2.0 3D, un motor de renderizado WebKit, un motor gráfico SGL, SSL y una biblioteca estándar de C Bionic [16].

Android ha tenido numerosas actualizaciones desde su liberación inicial. Estas actualizaciones típicamente corrigen fallos de programa y agregan nuevas funcionalidades. Desde abril del 2009, Las versiones de Android han sido desarrolladas bajo un nombre en clave y lanzamiento en orden alfabético: Cupcake, Donut, Éclair, Froyo, Gingerbread, Honeycomb, Ice Cream Sandwich, y Jelly Bean. La mayor actualización más reciente es Jelly Bean v4.2, el cual fue anunciado en Octubre del 2012.

2.5.1 DISTRIBUCIÓN EN EL MERCADO DE LAS VERSIONES DE ANDROID

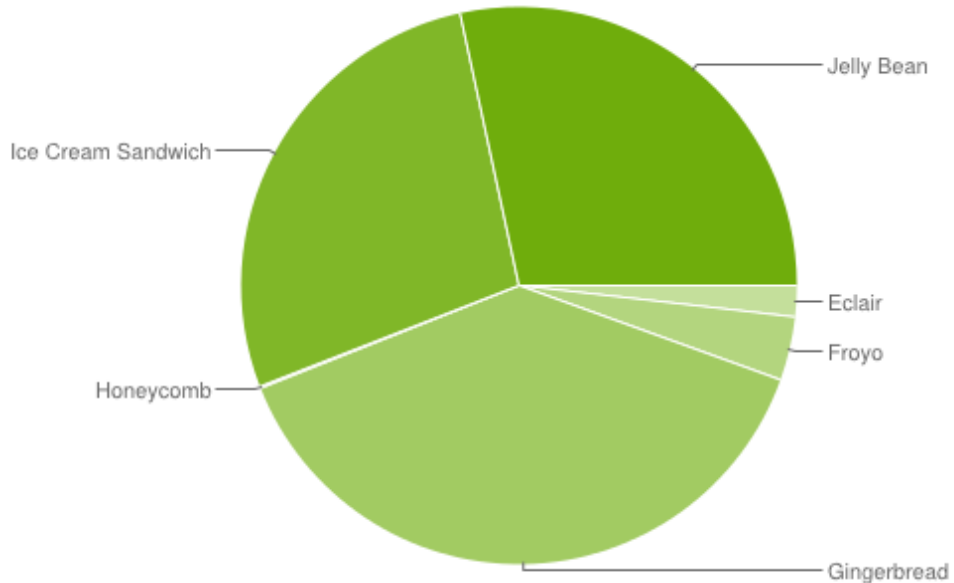


Figura 19: Distribución versiones Android en el mercado.

(FUENTE: http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Android_chart.png. Fecha: Mayo 01 de 2013)

2.5.2 CARACTERÍSTICAS DE ANDROID

- Es adaptable a pantallas de mayor resolución, VGA, biblioteca de gráficos 2D, 3D.
- Base de datos liviana SQLite para almacenamiento.
- Soporta conectividad GSM/EDGE, IDEN, CDMA, EV-DO, UMTS, BLUETOOTH, WI FI, LTE, HSDPA y WIMAX.
- El navegador web basado en el motor de código abierto WebKit.

- Máquina Virtual Dalvik diseñada específicamente para Android y optimizada para dispositivos móviles que funcionan con batería y que tienen memoria y procesador limitados.
- Soporta cámaras de fotos, de vídeo, pantallas táctiles, GPS, acelerómetros, giróscopos, magnetómetros, sensores de proximidad y de presión, sensores de luz, gamepad, termómetro, aceleración por GPU 2D y 3D.
- Incluye un emulador de dispositivos, herramientas para depuración de memoria y análisis del rendimiento del software.

Todas estas características permiten la creación y desarrollo de aplicaciones móviles, las cuales son programas diseñados para cumplir una tarea determinada.

2.6 APLICACIONES MÓVILES

Algunos tipos de aplicaciones móviles son:

- De sistema: Se relacionan con el funcionamiento de nuestro equipo, seguridad, registro de llamadas, gestión de mensajes, etc.
- Ofimáticas: para trabajar con documentos de texto hojas de cálculo, ficheros pdf, etc.
- Organización: Para manipular los contactos, calendarios, agendas, notas, etc.
- Web: Necesitan una conexión a internet para manejar correos electrónicos, navegadores web, mapas, redes sociales, etc.
- De accesibilidad: reconocimiento de voz, lectura de texto, etc.
- Multimedia: Juegos, música, videos, etc.

3. IMPLEMENTACIÓN DEL HARDWARE

La siguiente es la representación en diagramas de bloques del prototipo del goniómetro digital. Inicialmente, representamos el sistema de carga y regulación de voltaje a 3.3 voltios. Los acelerómetros y giróscopos están conectados al microcontrolador mediante el protocolo de comunicación IIC. La transmisión y recepción del Bluetooth RN42 está habilitada mediante el módulo SCI, el cual se encarga de la comunicación inalámbrica con el dispositivo móvil.

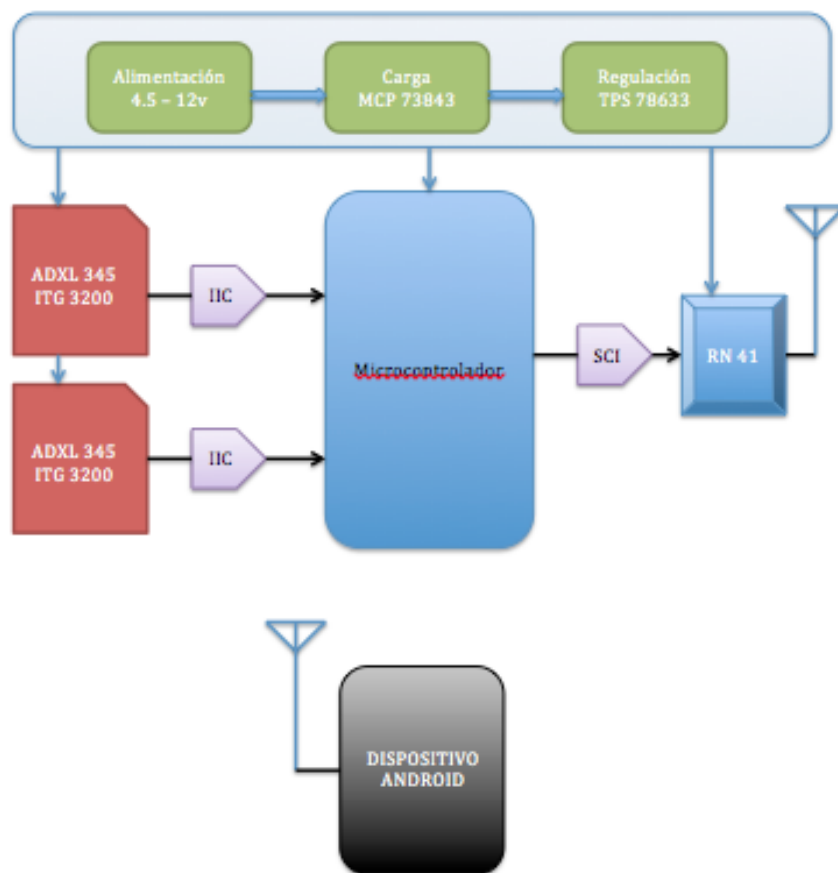


Figura 20: Diagrama de bloques del sistema

Para el diseño del circuito impreso del proyecto implementado, se trabajó en el programa “EAGLE PCB Software” que son las siglas de Easily Aplicable Graphical Layout Editor, donde se montaron los diagramas circuitales y se diseñó la tarjeta principal con sus respectivas conexiones hacia los sensores cinemáticos y el módulo Bluetooth para el correcto funcionamiento de este proyecto, buscando mitigar los factores que causan el ruido electromagnético, tratando de conseguir alta calidad a bajo costo y con una rápida respuesta, teniendo en cuenta las mediciones y valores tomados de las hojas de datos de cada uno de los componentes utilizados en el proyecto.

3.1 SISTEMA DE ALIMENTACIÓN Y CARGA

Se implementó un sistema de carga para alimentar la batería de Litio recargable, utilizando un dispositivo MCP73843 el cual se debe alimentar en un rango de voltaje entre 4.5v y 12v para controlar la carga. Además tiene un diodo LED indicador de carga manteniendo un control automático.

Para un óptimo funcionamiento del dispositivo, y apoyados en las hojas de datos de ellos, se elaboró una fuente de alimentación de 3.3 voltios con un regulador de voltaje TPS 78633 el cual tiene un nivel de dropout muy bajo, garantizando en todo momento el nivel de voltaje requerido entregado por la batería.

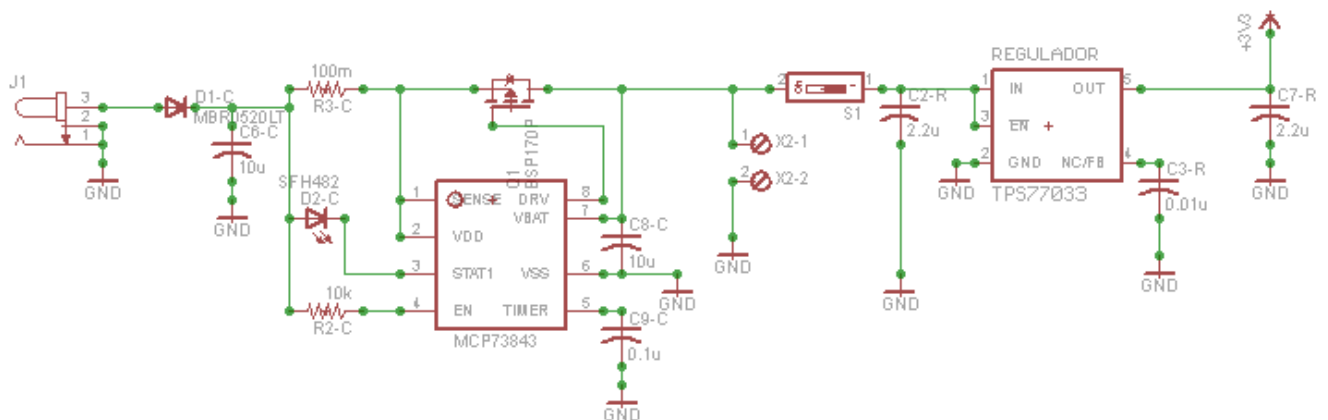


Figura 21: Circuito de carga y alimentación del dispositivo.

3.2 CIRCUITO DEL MICROCONTROLADOR

Se presenta el diagrama circuital del microcontrolador MCF51QE128 con sus respectivos periféricos. Se activaron los dos módulos IIC para la comunicación con los sensores cinemáticos.

El primer par de sensores está conectado al puerto A en los pines PTA2 y PTA3 que son los pines SDA (Serial Data) y SCL (serial Clock) del módulo mencionado. Además tienen sus respectivas resistencias en pull-up de 2.2 KOhmios. PTD2 y PTD3 son pines de interrupción.

Igualmente, en el puerto H en el segundo módulo IIC se conectó el segundo par de sensores a los pines PTH6 y PTH7 que son respectivamente, SCL y SDA. PTH0 y PTH1 son pines de interrupción.

Se activó el módulo SCI (Serial Communication Interface) para la comunicación con el dispositivo Bluetooth en el puerto B en los pines PTB0 y PTB1 que son que son RX (recepción) y TX (transmisión) respectivamente.

Se muestran los pines de alimentación a 3.3 voltios y las conexiones de puesta a tierra.

Los pines PTA5 y PTA4 son empleados para la conexión del programador USB Multilink de Pemicro. Este programador se encarga de entregar en formato binario la información del código que deberá ejecutar el microcontrolador. Se encarga de programar el código en la memoria del microcontrolador o microprocesador.

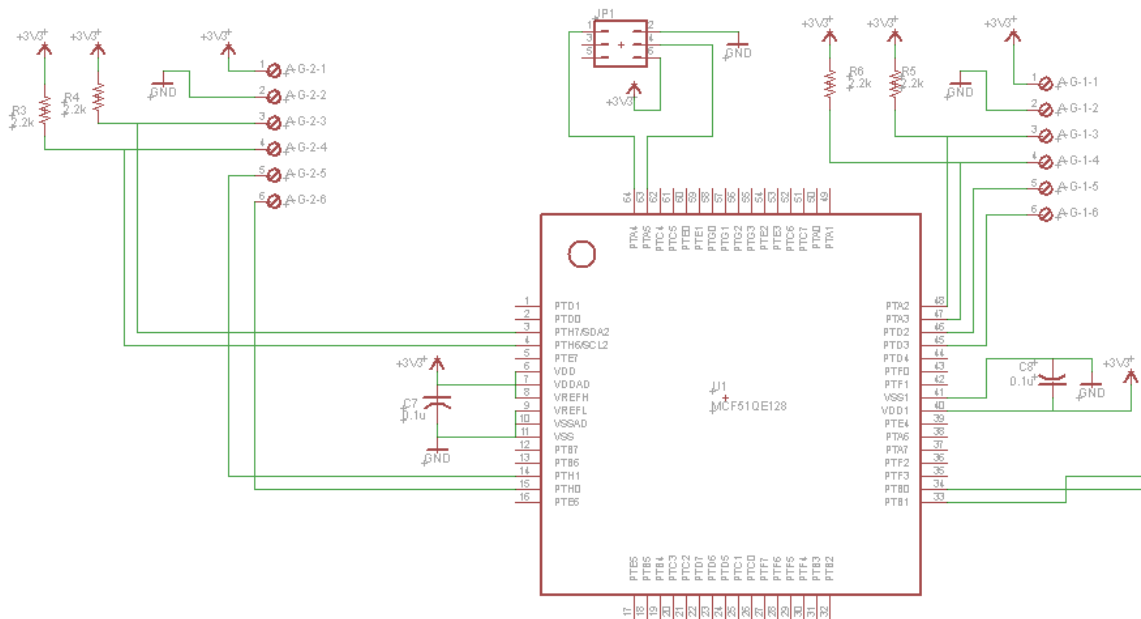


Figura 22: Conexión microcontrolador MCF51QE128

La figura 22 representa el programador Multilink para el microcontrolador. Este se conecta al PC a través de un cable USB. La conexión a la tarjeta del goniómetro se realiza por medio de los pines 63 y 64 del microcontrolador.



Figura 23: Programador de bajo volumen de Pemicro®.

(Fuente: www.pemicro.com)

En el anexo B se presenta el circuito y montaje de los sensores cinemáticos. También se muestra el circuito impreso del módulo.

El montaje del módulo bluetooth RN41 se especifica en el anexo C.

La siguiente figura representa el esquemático completo del circuito del goniómetro digital, elaborado con el software de diseño electrónico EAGLE⁵ PCB Software.

Se muestran todas las conexiones de los sensores cinemáticos en los módulos del microcontrolador, así como el sistema de alimentación y carga.

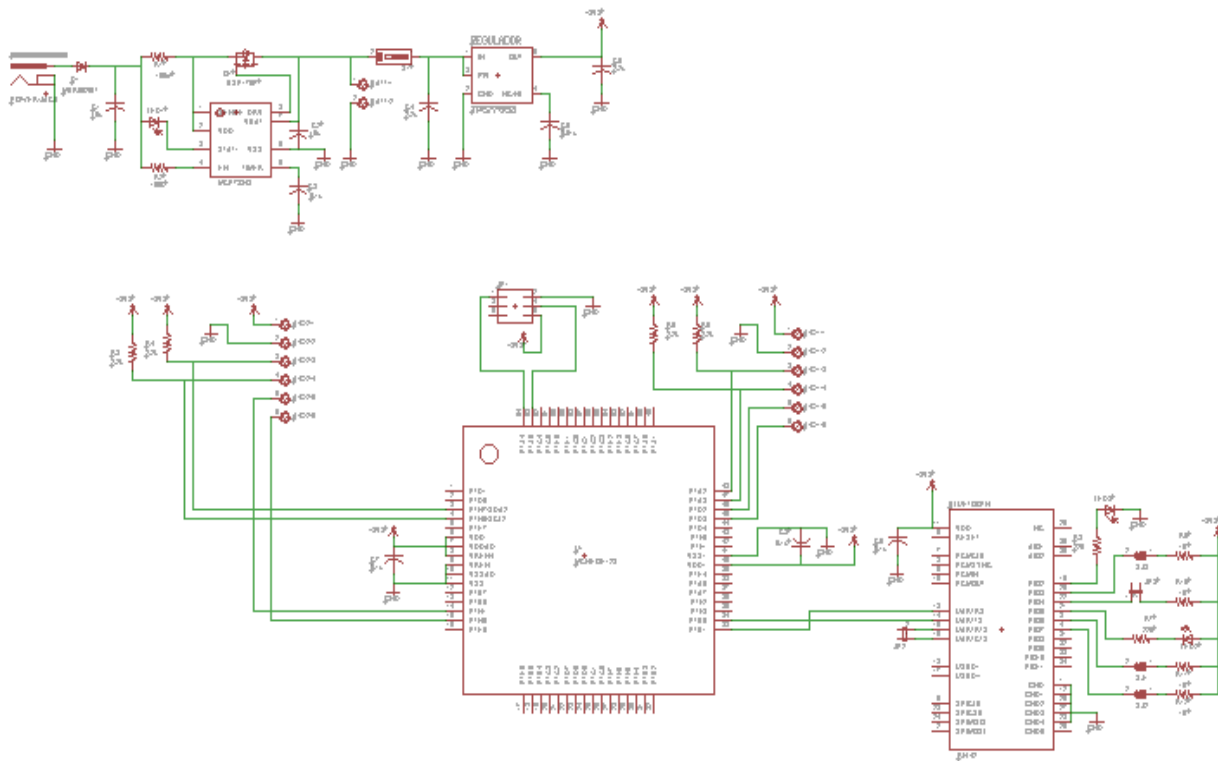


Figura 23: Esquemático del circuito del Goniómetro Digital

La figura 24 representa la tarjeta diseñada en EAGLE teniendo en cuenta las recomendaciones de diseño, evitando al máximo el ruido eléctrico, que es toda perturbación electromagnética que afecta al circuito digital y que puede producir errores. Este ruido puede ser externo al equipo electrónico, o puede ser producido por el propio equipo debido a variaciones bruscas de corriente, carga y descarga de condensadores, acoples capacitivos o inductivos entre las pistas de

⁵ Easily Aplicable Graphical Layout Editor

la tarjeta electrónica, entre otras. Aunque no se puede eliminar completamente, es posible atenuarlo para que afecte en menor grado el funcionamiento del sistema. Esto se logra haciendo las pistas del circuito impreso lo más cortas y anchas posibles, especialmente las líneas de alimentación. Se incluyen condensadores de desacople en los circuitos integrados. Para evitar el ruido por acoplamiento inductivo, se creó una gran malla de masa a ambos lados de la tarjeta, conectada a Tierra. Se tuvieron en cuenta las hojas de datos de cada uno de los componentes y sus criterios de diseño. Así también, se redujo el tamaño de la tarjeta a unas medidas cómodas para la buena manipulación de los usuarios.

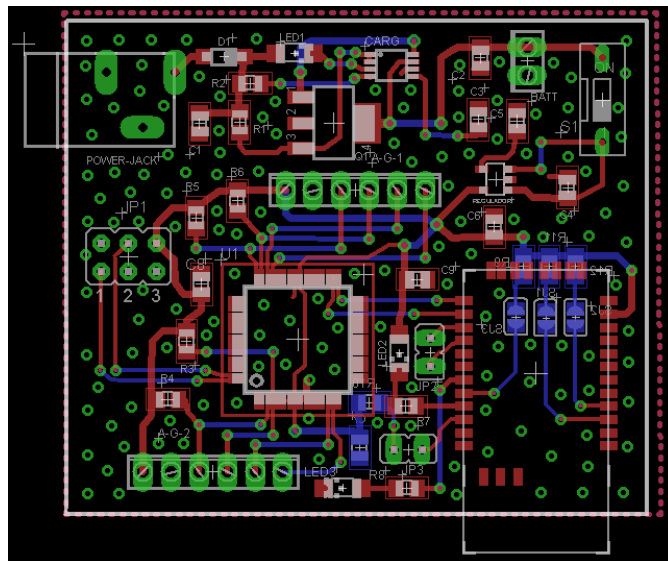


Figura 24: Board de la Tarjeta del Goniómetro Digital diseñada en EAGLE.

Al colocar el módulo RN42 sobre la tarjeta, las áreas bajo la antena y las conexiones de blindaje no deben tener restos de superficie, GND, o vías expuestas. Para obtener un rendimiento óptimo, el extremo de la antena del módulo RN42 deben sobresalir 5 mm más allá de cualquier caja de metal.

En el anexo D se muestra la board del prototipo del goniómetro en su capa frontal y trasera.

La figura # 25 muestra la tarjeta del prototipo del goniómetro digital con todos los dispositivos ensamblados. Se ven claramente las regletas donde se instalarán los sensores cinemáticos.

En la parte superior se encuentra todo el circuito de carga encargado de regular la alimentación del dispositivo a 3.3v .



Figura 25: Tarjeta con todos los dispositivos ensamblados.

Parte trasera del prototipo con todos los puntos de soldadura de cada uno de los dispositivos. Son notorias las resistencias R9, R11 y R12 con valor de 1K Ohmios con los que se configuran respectivamente los pines PIO3, PIO6 y PIO7 del módulo Bluetooth RN42.

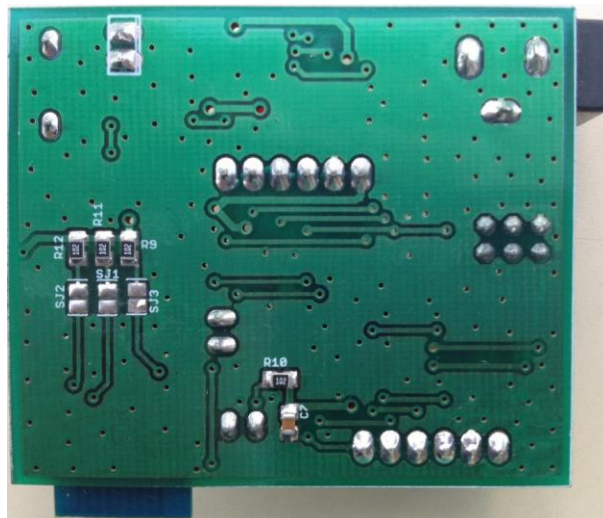


Figura 24: Imagen tarjeta parte trasera con los dispositivos.

Imagen del prototipo del goniómetro digital con los sensores y el bluetooth RN42 montados en la tarjeta, los cuales están conectados a los módulos IIC y SCI del microcontrolador respectivamente.

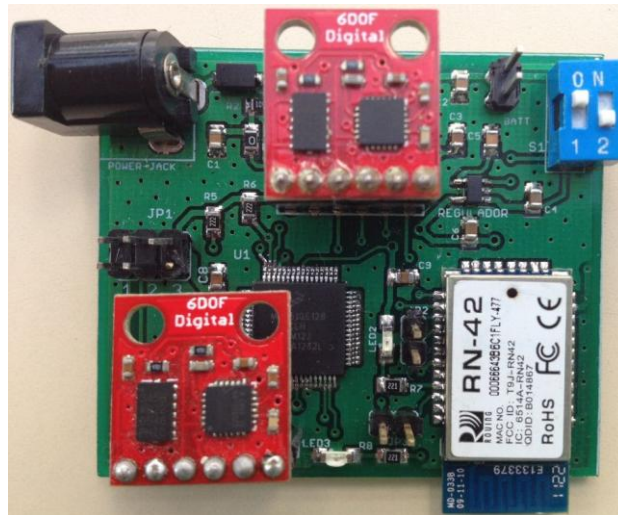


Figura 27: Tarjeta con los sensores instalados.

El acelerómetro y el giróscopo ensamblados en la tarjeta roja superior corresponden a la comunicación por el módulo IIC 1. El otro par de sensores se comunican a través del módulo IIC 2.

4. SOFTWARE DEL MICROCONTROLADOR

Una vez verificada la implementación del hardware, se procedió a la programación del microcontrolador, teniendo en cuenta las correctas inicializaciones de los módulos usados, como los son el módulo IIC para la comunicación con los sensores cinemáticos y el módulo SCI para la comunicación con el módulo Bluetooth RN 42.

El programa del microcontrolador MC9S08QE128 de Freescale⁶ se desarrolló en lenguaje C con el programa CodeWarrior IDE versión 6.2 el cual es una herramienta para la programación de diferentes dispositivos como MPU, MCU, DSP, entre otros, basado en un entorno IDE que integra edición de archivos, compilación optimizada, simulación de código, depuración y programación.

Para el acelerómetro 1 y el giróscopo 1 se configuraron los registros del módulo IIC1, mientras que para el acelerómetro 2 y el giróscopo 2 habilitó el modulo IIC2.

Para la comunicación IIC se configuraron los siguientes registros:

- IICxC1 para habilitar el módulo, las interrupciones, el modo maestro, modo Tx o Rx, la condición de Start, entre otros.
- IICxF para configurar la rata de baudios
- IICxS para indicar cuándo la transferencia se ha completado o está en progreso, bus ocupado o en espera, entre otros.

⁶ **Freescale Semiconductor, Inc.** es un fabricante estadounidense de semiconductores. Se centra en el mercado de los sistemas integrados y las comunicaciones.

- IICxD es el registro de datos. En modo de transmisión maestro, cuando se escribe una data en el registro IICxD, se inicia la transferencia de la data. El bit más significativo es enviado primero. En modo de transmisión esclavo, leer este registro inicia la transferencia del siguiente byte de datos.

4.1 OBTENCIÓN DE DATOS DE LOS SENSORES CINEMÁTICOS

Los siguientes son los registros que deben ser leídos de los sensores mediante el protocolo IIC.

ACELERÓMETROS

Reg 0x32	Data X0
Reg 0x33	Data X1
Reg 0x34	Data Y0
Reg 0x35	Data Y1
Reg 0x36	Data Z0
Reg 0x37	Data Z1

GIRÓSCOPOS

Reg 0x1D	Gyro_xout_h
Reg 0x1E	Gyro_xout_l
Reg 0x1F	Gyro_yout_h
Reg 0x20	Gyro_yout_l
Reg 0x21	Gyro_zout_h
Reg 0x22	Gyro_zout_l

Tabla 5: Registros de los sensores cinemáticos.

Para cada uno de los registros se creó una función para leerlos mediante el protocolo de comunicación IIC el cual está formado físicamente por dos hilos, el SDA (Serial Data) y el SCL

(Serial Clock) que son los que se polarizan lógicamente para generar niveles altos y bajos. Estos dos hilos son los que forman en su totalidad el bus y a ellos se conectan todos los dispositivos.

Cada dispositivo tiene una dirección propia tanto para lectura como para escritura.

Con un acelerómetro de tres ejes y suponiendo el objeto en reposo, podemos encontrar su orientación en el espacio ya que al saber que está sujeto a una aceleración de 1G, y con la ayuda de la trigonometría, podemos definir su orientación solo con las tres medidas de los ejes. Por medio de los acelerómetros podemos medir aceleraciones lineales, mientras que con los giróscopos medimos aceleraciones angulares. Si combinamos un acelerómetro de 3 ejes con un giróscopo de tres ejes tendremos perfectamente definida la orientación del objeto en el espacio.

En el siguiente gráfico denotamos a R como el vector de fuerza que el acelerómetro está midiendo que podría ser la fuerza de gravitación, la fuerza de inercia o una combinación de ambas.

Rx, Ry, Rz son proyección del vector de R en los ejes X, Y, Z.

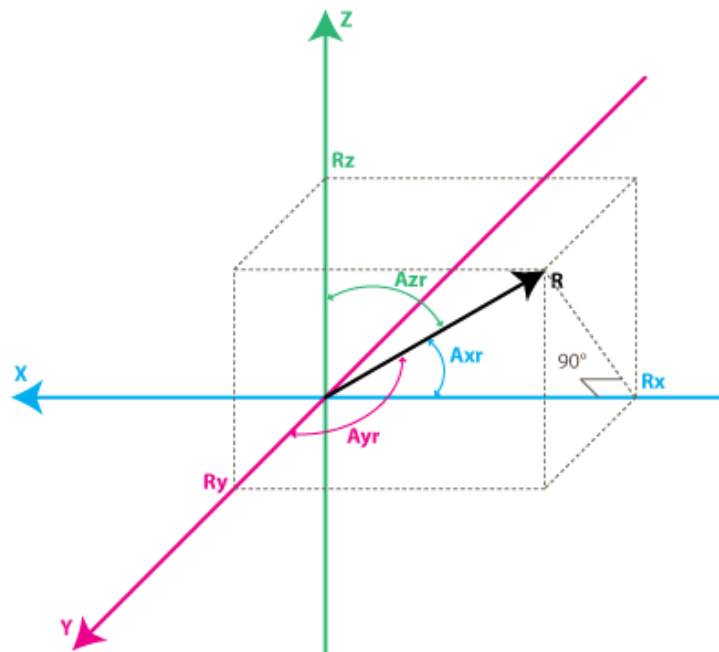


Figura 25: Vector fuerza del acelerómetro en 3 ejes.

$$\text{Donde, } R^2 = Rx^2 + Ry^2 + Rz^2 \quad (1)$$

Podemos encontrar ahora los ángulos usando la función arccos ():

$$Axr = \cos^{-1} \frac{Rx}{R} \quad (2)$$

$$Ayr = \cos^{-1} \frac{Ry}{R} \quad (3)$$

$$Azr = \cos^{-1} \frac{Rz}{R} \quad (4)$$

Los cosenos directores nos indican el ángulo que forma el vector con respecto a cada uno de los ejes:

$$\cos x = \cos Axr = \frac{Rx}{R} \quad (5)$$

$$\cos y = \cos Ayr = \frac{Ry}{R} \quad (6)$$

$$\cos z = \cos Azr = \frac{Rz}{R} \quad (7)$$

Por otro lado, cada canal del giróscopo mide la rotación alrededor de uno de los ejes. Este sensor es empleado debido a que es menos sensible a los movimientos mecánicos lineales, por lo que ayuda a suavizar los errores del acelerómetro. Al hacer un promedio de los datos que vienen del acelerómetro y del giróscopo, se puede obtener una estimación relativamente mejor de la inclinación del dispositivo.

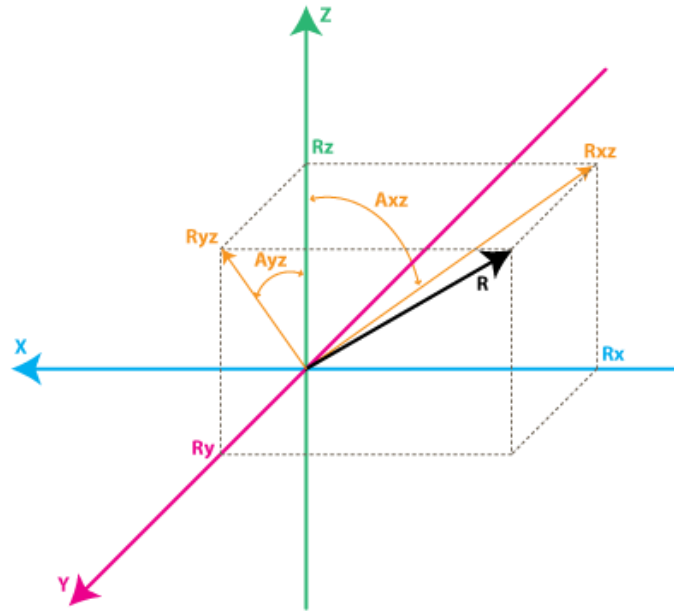


Figura 26: Proyección del vector R en 2 ejes del giróscopo

A partir del teorema de Pitágoras obtenemos lo siguiente:

$$R_{xz}^2 = R_x^2 + R_z^2 \quad (8)$$

$$R_{yz}^2 = R_y^2 + R_z^2 \quad (9)$$

Nota: El programa desarrollado se presenta como archivo anexo.

Para realizar la conexión Bluetooth con el microcontrolador MCF51QE128, se configuraron los siguientes registros para el módulo SCI:

- SCI1C1 para la inicialización del módulo SCI
- SCI1C2 para activar las interrupciones de transmisión y recepción
- SCI1BD para controlar la escala de baudios a la cual se transmite y se recibe la información.
- El registro SC1xD se utiliza para recibir o transmitir un dato por el puerto serial.

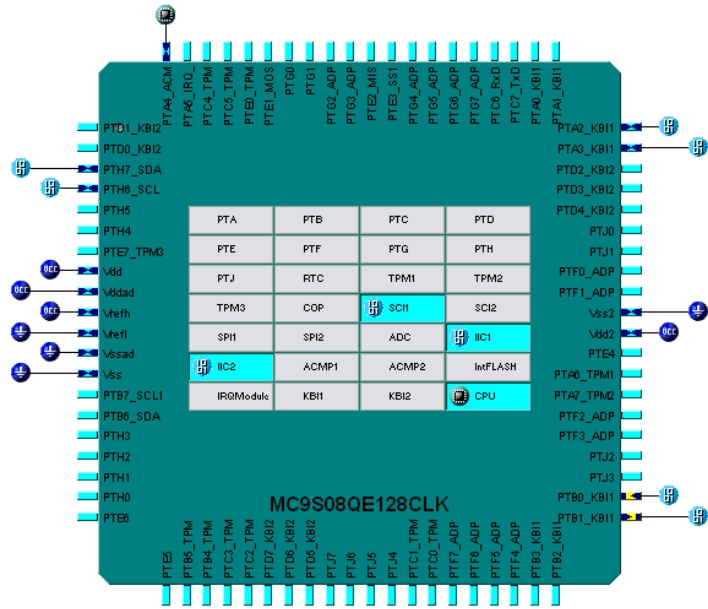


Figura 27: Inicialización de los módulos IIC y SCI del microcontrolador mediante el programa Codewarrior.

5. APLICACIÓN MÓVIL

Nuestro aplicativo móvil se basó en Google App Inventor [17] creado a mediados de 2009 por el profesor Harold Abelson del MIT (Instituto tecnológico de *Massachusetts*), la cual es una aplicación de Google Labs diseñada para crear desarrollos de software para el sistema operativo ANDROID.

App Inventor es completamente gratuito, no necesita permisos especiales para su implementación y es compatible con el módulo Bluetooth RN42 empleado en nuestro dispositivo. Por esta razón decidimos implementarlo bajo este sistema.

App Inventor se ejecuta a través de un navegador Web por lo cual es necesario tener una cuenta de Google. Si se está usando un teléfono, se trabaja con el teléfono conectado al ordenador mediante un cable USB. La aplicación va a surgir en el teléfono poco a poco a medida que se trabaja. Si no se tiene un teléfono celular conectado, hay un teléfono emulador incluido con el paquete de instalación de App Inventor que se puede utilizar en su lugar. Cuando se termina la construcción de la aplicación, se compila (archivo apk) y se instala en cualquier teléfono Android, como cualquier otra aplicación. También se puede compartir.

En esta plataforma se crean las aplicaciones enlazando un conjunto de bloques a partir de unas herramientas básicas. Este editor de bloques emplea la librería Open Blocks de Java para crear un lenguaje visual a partir de bloques bajo licencia libre (MIT License). El compilador que traduce el lenguaje visual de los bloques para la aplicación en Android utiliza Kawa como lenguaje de programación, distribuido como parte del sistema operativo GNU de la Free Software Foundation [18].

5.1 EXPLICACIÓN BÁSICA DE LA APLICACIÓN MÓVIL

Nuestra aplicación desarrollada para dispositivos Android, tiene el nombre de **GONIÓMETRO DIGITAL**. Está conformada por varias pantallas o “Screens” a través de los cuales podemos ver toda la información y contenido de la aplicación por medio de los menús y botones que la componen.

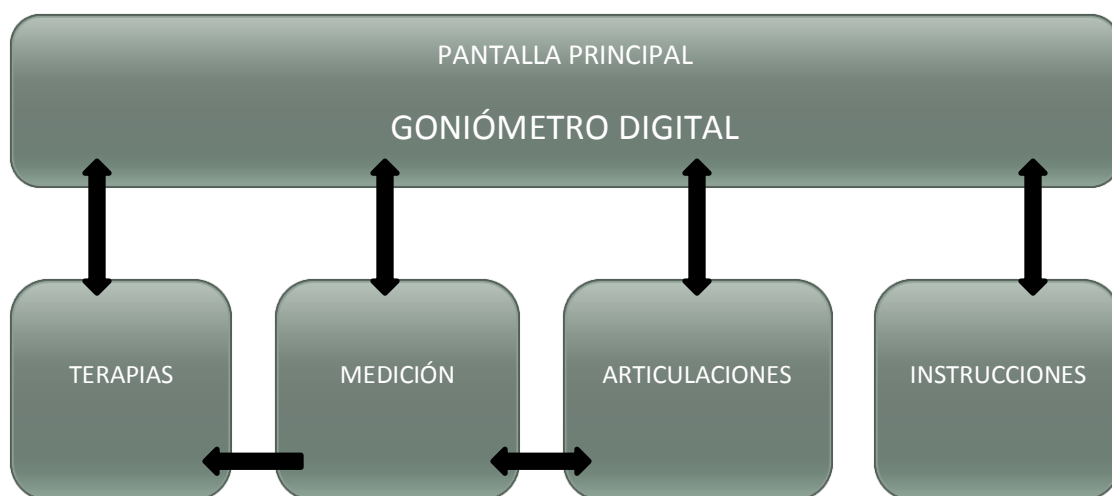


Figura 28: Diagrama de bloques de la aplicación móvil.

El diagrama de bloques de la figura 39 muestra la forma en que se puede navegar por la aplicación a través de cada una de las pantallas.

El ícono creado de la aplicación móvil instalada en un teléfono celular Motorola Defy con un sistema operativo Android 2.3, se muestra en la figura 40. Representa la medición de una articulación superior, como lo es el codo derecho. Sobre él se nota un goniómetro de regletas. De igual forma, la aplicación puede ser instalada en cualquier dispositivo con sistema operativo Android.

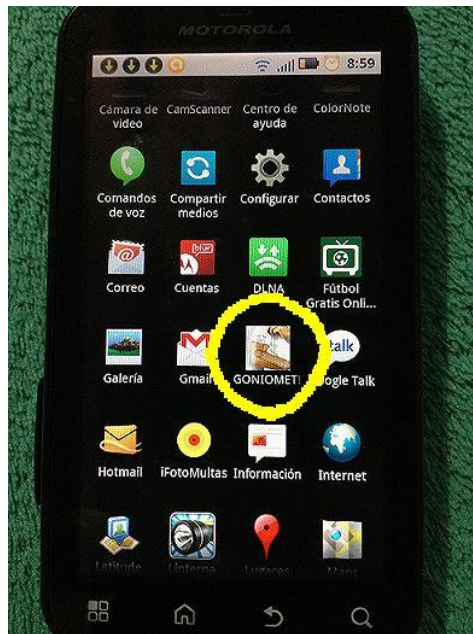


Figura 29: Ícono de la aplicación móvil.

Cuando la aplicación es descargada, automáticamente se ubica en la carpeta que contiene todas las aplicaciones que contiene el teléfono celular, facilitando su búsqueda. Al hacer Click sobre ella, inmediatamente se inicia el programa de la aplicación y nos presenta todo un menú de opciones para navegar a través de ella.

PANTALLA PRINCIPAL

Nótese que en la parte superior se ve claramente el nombre de la aplicación.

Se cuenta con una serie de botones con su respectivo nombre para seleccionar la opción deseada, los cuales son:

1. Conectar BLUETOOTH: Para enlazar nuestro dispositivo bluetooth con el móvil Android.

2. Botón ARTICULACIONES: Donde se encuentra la información de los ángulos máximos y mínimos de las articulaciones del cuerpo humano.
3. Botón TERAPIAS: Aquí podemos encontrar las terapias almacenadas, con los valores máximos y mínimos obtenidos en cada sesión.
4. Botón INSTRUCCIONES: Se presenta un conjunto de instrucciones rápidas para emplear el dispositivo.
5. Botón SALIR: Al presionarlo, damos por finalizado el uso de la aplicación y esta se cierra inmediatamente llevándonos al menú principal de aplicaciones del dispositivo Android.

Su pantalla principal o Screen1, se ve de la siguiente manera:



Figura 30: Pantalla principal de la aplicación móvil.

PANTALLA ARTICULACIONES

En esta pantalla se presentan los valores indicados según la bibliografía médica de los ángulos máximos y mínimos de las principales articulaciones del cuerpo humano. Se presentan los valores de las mediciones de los posibles movimientos del codo, la muñeca y las rodillas.



Figura 31: Menú Articulaciones en la Aplicación

PANTALLA TERAPIAS

En esta pantalla vemos los valores de los ángulos máximos y mínimos tomados en sesiones anteriores, con los cuales podemos analizar la evolución del paciente a lo largo de sus terapias. Para cada sesión se almacena el valor del ángulo mínimo y el máximo obtenidos por los sensores cinemáticos.



Figura 32: Menú Terapias en la Aplicación

El botón REINICIAR borra los datos anteriores y deja todas las sesiones en cero.

El botón VOLVER nos devuelve al menú principal.

PANTALLA INSTRUCCIONES

Se enumeran las instrucciones precisas para hacer uso del dispositivo y almacenar los datos obtenidos.



Figura 33: Menú Instrucciones en la Aplicación

En la parte inferior se encuentra el botón VOLVER para regresar al menú de la pantalla principal.

PANTALLA DE MEDICIÓN

En esta pantalla es donde se puede visualizar en la parte superior, el ángulo medido por los sensores en tiempo real.

En la parte inferior observamos el ángulo mínimo y máximo medidos en esa sesión. A medida que varía el valor del ángulo recibido por los sensores, se hace una comparación con los datos almacenados tanto menores como mayores, y si alguno de estos valores cambia, la aplicación se actualiza y muestra los nuevos datos.



Figura 34: Menú Medición en la Aplicación

Al presionar ARTICULACIONES podremos ver la información referente a los ángulos máximos y mínimos de las principales articulaciones del cuerpo humano.

Al dar click sobre el botón GUARDAR, se abrirá la pantalla de TERAPIAS y allí se almacenan los datos correspondientes a esa sesión.

5.2 CÓMO DESCARGAR LA APLICACIÓN

1. La aplicación **GONIÓMETRO DIGITAL** se puede descargar a nuestro smartphone Android a través del cable de conexión USB del teléfono, directamente desde nuestro sitio web creado en App Inventor⁷, que es donde está guardada nuestra aplicación.

⁷ <http://www.tuappinvetorandroid.com> . Sitio web donde se crea la cuenta de Google para desarrollar las aplicaciones

2. Por medio de App Inventor podemos crear el código QR de nuestra aplicación, facilitando su descarga. Solo es necesario que el dispositivo móvil Android tenga un lector de códigos de barras para que lea este, e inmediatamente se inicia la descarga. El usuario solo tiene que aceptarla.



Figura 35: Código QR para descargar aplicación.

CONCLUSIONES

La goniometría médica se encarga tanto de evaluar la posición de las articulaciones en el espacio, como de su arco de movimiento en cada uno de los tres planos espaciales.

Con el apoyo de la teoría de circuitos electrónicos y de diseño electrónico, se desarrolló la tarjeta del prototipo del goniómetro digital permitiendo la integración de todos los dispositivos que la componen.

Basados en nuevas tecnologías de transmisión de datos inalámbricos, se implementó una comunicación entre el prototipo y un dispositivo móvil encargado de recibir los datos obtenidos por los sensores cinemáticos para su posterior análisis.

Aprovechando los nuevos desarrollos para plataformas móviles libres, se desarrolló una aplicación para la comunicación de dispositivos móviles que tienen sistema operativo Android, con el prototipo del goniómetro digital. Esta se encarga de mostrar visualmente los datos obtenidos por los sensores y brinda al usuario información necesaria para la interpretación de los resultados conseguidos.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] José Luís de la Cruz González. José Luís Mesa Mingorance. 1997. Instrumentos de Topografía. Recordando su historia. Universidad de Jaén.
- [2] Suárez R. José. 2010. La goniometría en la gimnasia rítmica deportiva.
- [3] Claudio H. Taobadela. 2007. Goniometría. Una herramienta para la evaluación de las incapacidades laborales.
- [4] Brian Coley, Brigitte M. Jolles, Alain Farron, Aline Bourgeois, Francois Nussbaumer, Claude Pichonnaz, Kamiar Aminian. 2006. .Outcome evaluation in shoulder surgery using 3D kinematics sensors
- [5] Orozco D. Andrés, Peñuela P. Leonardo, Cardona Juan F., Aljure V. José D, Castaño S. Víctor D. Acquisition and Processing of Kinematic Variables for Biomechanical Analysis of Movement
- [6] Josep Maria Font, Joaquim A. Batlle. Posicionamiento láser dinámico de robots móviles mediante ángulos absolutos.
- [7] Marieb, E.N. 1995. Human Anatomy and Physiology, 3rd ed. Benjamin/Cummings, Redwood City, CA, USA.
- [8] Ojeda G. José. 2005. Valoración de la movilidad del sistema articular. Ed Díaz de Santos.
- [9] Múnera H. Diego. Microcontroladores de 32 bits Coldfire V1/Familia JM.
- [10] Accelerometer ADXL 345. [en línea], <Disponible en <http://www.sparkfun.com/datasheets/Sensors/Accelerometer/ADXL345.pdf>>
- [11] Gyroscope ITG 3200. [en línea], <Disponible en <http://www.sparkfun.com/datasheets/Sensors/Gyro/PS-ITG-3200-00-01.4.pdf>>
- [12] Three axis gyroscope. [en línea], <Disponible en <http://www.openhacks.com/page/productos/id/96/title/ITG3200-Gir%C3%B3scopo-de-3-ejes-con-salida-digital>>

- [13] Breakout para Giroscopio ITG-3200 con Tres Ejes y Salida Digital [en línea], <Disponible en <http://www.riabelectronics.cl/triple-axis-digital-output-gyro-itg-3200-breakout.html>>
- [14] Bluetooth RN 41. [en línea], <Disponible en <http://www.rovingnetworks.com/products/RN41>>
- [15] Android devices. [en línea], <Disponible en <http://www.dailytech.com/article.aspx?newsid=27908>>
- [16] Android. [en línea], <Disponible en <http://es.wikipedia.org/wiki/Android>>
- [17] MIT App Inventor. [en línea], <Disponible en <http://appinventor.mit.edu>>
- [18] App Inventor. [en línea], <Disponible en http://es.wikipedia.org/wiki/App_Inventor>