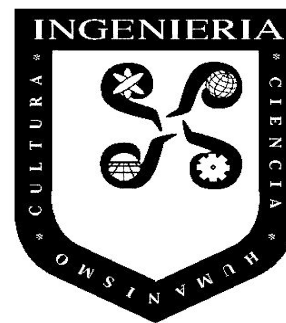




# UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MÉXICO

## FACULTAD DE INGENIERÍA



**Prototipo de un goniómetro digital empleando el  
sistema Kinect de Microsoft**

### **Tesis**

**Para obtener el grado de  
Maestro en Informática**

**PRESENTA:  
ING. JOSÉ RAMÓN CONSUELO ESTRADA**

**ASESORES:  
Dr. OTNIEL PORTILLO RODRIGUEZ  
Dr. JORGE RODRIGUEZ ARCE**

Toluca México, Septiembre 2014



**UAEM** | Universidad Autónoma  
del Estado de México

**Facultad de Ingeniería**

Ciudad Universitaria, Toluca, México; a 12 de agosto de 2014

**Ing. José Ramón Consuelo Estrada  
Presente.**

A continuación transcribo el tema y capitulado aprobado por esta Institución para el desarrollo de su tesis dirigida por el Dr. Otniel Portillo Rodríguez y el Dr. Jorge Rodríguez Arce de la Maestría en Informática, siendo de la siguiente manera:

**“PROTOTIPO DE UN GONIÓMETRO DIGITAL EMPLEANDO EL SISTEMA KINECT  
DE MICROSOFT”**

	Resumen
	Abstract
Capítulo 1	Introducción
Capítulo 2	Goniometría
Capítulo 3	Análisis del prototipo
Capítulo 4	Diseño del prototipo
Capítulo 5	Implementación del prototipo
Capítulo 6	Experimentos
Capítulo 7	Conclusiones y trabajo futuro
	Referencias
	Anexos

Asimismo, para la aprobación de la tesis y demás trámites deberá sujetarse al reglamento respectivo de la Institución.

**Atentamente,  
Patria, Ciencia y Trabajo**

*2014, 70 Aniversario de la Autonomía U.A.E.M.*

FACULTAD DE INGENIERIA  
U.A.E.M.

**M. en I. Raúl Vera Noguez  
Director**

c.c.p. Archivo.



[www.uaemex.mx](http://www.uaemex.mx)

Cerro de Coatepec S/N, Ciudad Universitaria; Toluca México  
Tel. (722) 2-14-08-55 / 2-15-13-51

## ***DEDICATORIAS***

A Dios, por el regalo de la vida y la felicidad del día a día.

A mis Padres, por ayudarme a crecer, gracias por estar conmigo en todo momento, por la paciencia que han tenido para enseñarme, por su amor, por sus cuidados y por toda la ayuda que me han dado.

A mis hermanos, por haberme enseñado a salir adelante. Gracias por su paciencia, gracias por preocuparse por su hermano menor, pero sobre todo, gracias por estar a mi lado.

A Gaby, por permitirme formar parte de tu vida, gracias por tu amor, por tu ayuda y por aguantarme.

A Bety, por estar siempre conmigo en los momentos importantes de mi vida.

## ***AGRADECIMIENTOS***

Gracias al Dr. en C. Otniel Portillo Rodríguez y al Dr. en C. Jorge Rodríguez Arce, por el apoyo, el asesoramiento, los consejos y sobre todo por su infinita paciencia.

# *RESUMEN*

En esta tesis se presenta el diseño, implementación y validación de un prototipo de goniómetro digital utilizando una computadora y el sistema Kinect de Microsoft. Se evaluó la validez<sup>1</sup> y confiabilidad<sup>2</sup> de las medidas de los rangos de movimiento (ROMs, por sus siglas en inglés) obtenidas mediante el prototipo, para determinar si son adecuadas para ser utilizadas en la práctica clínica.

La elección de las articulaciones analizadas se basó en dos criterios, el primero es que, hasta el momento, el sistema Kinect no permite la detección de todas las articulaciones del cuerpo humano y de las que es capaz de detectar no todas corresponden con las articulaciones anatómicamente aceptadas, tal y como se describe en [Borenstein, G. 2012], [HIG. 2012] y [Bockstege, B. 2011]. El segundo criterio fue la postura y el tipo de movimiento que se requieren para la obtención del ROM de la articulación, ya que el sistema Kinect presenta algunas limitaciones bajo ciertas posturas del sujeto medido. Para el segundo criterio se utilizaron las recomendaciones de especialistas en Terapia Física del Centro Médico “Lic. Adolfo López Mateos” (CMLALM) perteneciente al Instituto de Salud del Estado de México (ISEM) ubicado en Toluca Estado de México y en los métodos y procedimientos descritos en [Taboadela, C. 2007] y [Norkin, C. C. 2009].

La evaluación del prototipo se hizo mediante el Coeficiente de Correlación Intraclase (ICC, por sus siglas en inglés) aplicado a tres experimentos, el primero de ellos tuvo como objetivo evaluar la confiabilidad de las mediciones, así mismo, determinar los movimientos con mejores resultados para ser utilizados en el resto de las evaluaciones. Este experimento se realizó con el apoyo de cinco estudiantes de la Facultad de Ingeniería (FI) de la Universidad Autónoma del Estado de México (UAEM).

El objetivo del segundo experimento fue determinar el grado de independencia que tienen las mediciones hechas entre distintos especialistas, cuando se utiliza el prototipo desarrollado. Este experimento se realizó en las instalaciones del CMLALM con la colaboración de tres especialistas en Terapia Física y seis participantes sanos.

Finalmente, el tercer experimento, tuvo como objetivo evaluar la validez de las mediciones hechas utilizando el prototipo desarrollado y tomando como estándar las mediciones realizadas por los especialistas con el goniómetro universal. Este experimento también se realizó en las instalaciones del CMLALM con la colaboración de un especialista en Terapia Física y seis participantes sanos.

Los resultados obtenidos muestran que las mediciones realizadas con el prototipo tienen una buena confiabilidad. La validez resultó mala con el método propuesto, debido a que la ubicación de los puntos detectados por el sistema Kinect para el cálculo de los ángulos difiere de los utilizados por los especialistas empleando goniómetro universal, por lo cual

---

<sup>1</sup> La validez de una medida se refiere a qué tan bien dicha medida representa el valor real de la variable de interés [Norkin, C. C. 2009].

<sup>2</sup> Una medida goniométrica es confiable si sucesivas mediciones del ángulo de una articulación en el mismo sujeto y bajo las mismas condiciones brindan el mismo resultado [Norkin, C. C. 2009].

se sugiere reemplazar las medidas de los especialistas por otro estándar de comparación para verificar la validez del prototipo. Finalmente, los resultados muestran que las mediciones realizadas con el prototipo son independientes del médico que las toma.

# Contenido

Capítulo 1: Introducción.....	1
1.1 Estado del arte.....	2
1.2 Planteamiento del problema.....	5
1.3 Hipótesis.....	6
1.4 Alcance.....	6
1.5 Objetivo principal.....	7
1.6 Objetivos secundarios.....	7
1.7 Contenido.....	7
Capítulo 2: Goniometría.....	9
2.1 Mediciones goniométricas.....	10
2.1.1 Planimetría.....	12
2.1.2 Posición neutra o posición cero.....	13
2.2 Instrumentos de medición.....	14
2.2.1 Goniómetro.....	15
2.2.2 Electrogoniómetro.....	16
2.2.3 Inclinómetro.....	17
2.3 Registro de mediciones.....	17
2.4 Procedimientos.....	18
Capítulo 3: Análisis del prototipo.....	20
3.1 Análisis del problema.....	20
3.1.1 Inconvenientes detectados.....	21
3.1.2 Situaciones susceptibles de mejora.....	21
3.1.3 Identificación de objetivos.....	21
3.2 Requerimientos.....	22
3.2.1 La interfaz de usuario.....	22
3.2.2 Secuencia de eventos.....	23
3.2.3 Diagramas de casos de uso.....	23
3.2.3.1 Caso de uso: Operador del sistema.....	24
3.2.3.2 Caso de uso: Participante.....	26
3.2.3.3 Caso de uso: Especialista.....	27
3.2.4 Definición de los datos.....	28
Capítulo 4: Diseño del prototipo.....	30
4.1 Articulaciones.....	31
4.2 Identificación de clases.....	31
4.3 Modelado de clases.....	32
4.3.1 Identificación de los métodos y atributos.....	33
4.4 Diagramas de clases.....	34
4.4.1 Relación de composición.....	34
4.4.2 Relación de herencia.....	35
4.5 Diagrama de estados.....	36
4.6 Diagrama de actividades.....	37
4.7 Diseño de la base de datos.....	38
Capítulo 5: Implementación del prototipo.....	40
5.1 Elección de las herramientas.....	40

5.1.1 Sistema Kinect.....	40
5.1.2 Processing.....	41
5.1.3 OpenNI.....	42
5.1.4 PostgreSQL.....	42
5.2 Notas sobre la instalación.....	43
5.3 Pruebas iniciales.....	44
5.3.1 Prueba 1: Obtener imagen.....	44
5.3.2 Prueba 2: Obtención del esqueleto.....	45
5.3.3 Prueba 3: Seguir la articulación de la mano.....	46
5.3.4 Prueba 4: Análisis de los datos de la mano.....	48
5.3.4.1 Diseño del filtro.....	50
5.3.5 Prueba 5: Distancia entre dos articulaciones.....	54
5.3.6 Prueba 6: Ángulo entre dos articulaciones.....	56
5.4 Proceso para calcular el ROM de una articulación.....	57
5.4.1 Diseño de la interfaz.....	59
Capítulo 6: Experimentos.....	62
6.1 Descripción de los experimentos.....	63
6.2 Experimento 1: Confiabilidad.....	64
6.2.1 Criterios de inclusión.....	64
6.2.1.1 Criterios de inclusión.....	64
6.2.1.2 Criterios de exclusión.....	64
6.2.1.3 Criterios de eliminación.....	65
6.2.2 Método.....	65
6.2.3 Procedimiento.....	66
6.2.4 Resultados.....	66
6.3 Experimento 2: Independencia entre especialistas.....	68
6.3.1 Criterios de inclusión.....	68
6.3.1.1 Criterios de inclusión para especialistas.....	68
6.3.1.2 Criterios de exclusión.....	68
6.3.1.3 Criterios de eliminación.....	68
6.3.2 Método.....	68
6.3.3 Procedimientos.....	69
6.3.4 Resultados.....	71
6.4 Experimento 3: Validez.....	72
6.4.1 Procedimientos.....	72
6.4.2 Resultados.....	72
Capítulo 7: Conclusiones y trabajo futuro.....	73
7.1 Conclusiones.....	73
7.1.1 Conclusiones para la Hipótesis.....	73
7.1.1.1 Confiabilidad.....	73
7.1.1.2 Validez.....	74
7.1.2 Resultados por objetivos.....	75
7.1.2.1 Objetivo principal.....	75
7.1.2.2 Objetivos secundarios.....	75
7.2 Aportes.....	76
7.2.1 Uso del sistema Kinect como goniómetro digital.....	76

7.2.2 Diseño de filtro.....	76
7.2.3 Evitar el uso de método invasivos.....	76
7.2.4 Validez y confiabilidad.....	76
7.2.5 Homogeneizar la medición del ROM.....	77
7.2.6 Colaboración interdisciplinaria.....	77
7.3 Trabajo futuro.....	77
7.3.1 Estabilidad del sistema.....	77
7.3.2 Agregar articulaciones.....	78
7.3.3 Medir al participante con distintas posturas.....	78
7.3.4 Interfaz de usuario.....	78
Referencias.....	79
Anexo A: Unified Modeling Language UML.....	82
Anexo B: Filtro pasa bajas.....	87
Anexo C: Consentimiento informado.....	91
Anexo D: Oficio de aceptación del protocolo en el CMLALM.....	94



## Índice de figuras

Figura 1: Articulaciones detectadas por Kinect.[HIG. 2012].....	2
Figura 2: Cálculo de ROM con DrGoniometer. [DrGoniometer. 2012].....	4
Figura 3: Posición del goniómetro en la articulación del codo. Modificado de [Norkin, C. C. 2009].....	9
Figura 4: Planos del cuerpo [Taboadela, C. 2007].....	12
Figura 5: Posición neutra o posición cero [Taboadela, C. 2007].....	13
Figura 6: Goniómetro universal [Taboadela, C. 2007].....	14
Figura 7: Goniómetros metálicos de distintos tamaños [Norkin, C. C. 2009].....	15
Figura 8: Brazos distal y proximal a la articulación [Norkin, C. C. 2009].....	16
Figura 9: Electrogoniómetro [Taboadela, C. 2007].....	16
Figura 10: Distintos modelos de inclinómetros [Norkin, C. C. 2009].....	17
Figura 11: Caso de uso: Operador del sistema.....	24
Figura 12: Caso de uso: Participante.....	26
Figura 13: Caso de uso: Especialista.....	27
Figura 14: Hoja de registro para la articulación de la cadera.....	28
Figura 15: Estructura general del goniómetro digital.....	30
Figura 16: Resumen de atributos y métodos de las clases definidas.....	34
Figura 17: Diagrama de clases mostrando la relación de composición.....	35
Figura 18: Relación de herencia para el manejo de la base de datos.....	35
Figura 19: Diagrama de estados para la toma de una medida de un ROM.....	36
Figura 20: Diagrama de actividades para la medición del ROM.....	37
Figura 21: Diagrama ER para la base de datos del prototipo.....	38
Figura 22: Sistema Kinect sin cubierta.....	41
Figura 23: Cámara en profundidad (izquierda) y cámara convencional (derecha) [Borenstein, G. 2012].....	44
Figura 24: Esqueleto identificado mediante OpenNI y el sistema Kinect [Borenstein, G. 2012].....	46
Figura 25: Seguimiento de la articulación de la mano [Borenstein, G. 2012].....	46
Figura 26: Relación entre el mundo de tres dimensiones y la imagen proyectada.....	48
Figura 27: Clase Archivo para guardar los datos de la articulación.....	48
Figura 28: Gráficas de comparación antes y después de aplicar el filtro.....	49
Figura 29: Modelo generado por simulink.....	50
Figura 30: Diseño del filtro con fdatool.....	51
Figura 31: Modelo empleado para el filtro.....	52
Figura 32: Resultado de la simulación del filtro con Matlab.....	52
Figura 33: Clases para utilizar el filtro diseñado.....	54
Figura 34: Calculando la distancia entre articulaciones.....	56
Figura 35: Ángulo entre articulaciones adyacentes.....	56
Figura 36: Posiciones inicial y final para el cálculo del ROM de una articulación.....	58
Figura 37: Proceso general para calcular el ROM de una articulación.....	59
Figura 38: Interfaz final del prototipo de goniómetro digital.....	59
Figura 39: Diferencias entre las articulaciones Kinect y las anatómicas.....	74
Figura 40: Representación de un diagrama de clases (herencia).....	83
Figura 41: Representación de una clase en UML.....	83

Figura 42: Representación de un caso de uso en UML.....	84
Figura 43: Representación de un diagrama de actividades.....	85
Figura 44: Representación de un diagrama de estados.....	86
Figura 45: Modelo básico de un filtro.....	87
Figura 46: Tipos de filtros.....	88
Figura 47: Diagrama de bloques de filtros (a) FIR y (b) IIR.....	89
Figura 48: Oficio de aprobación del protocolo en el CMLALM.....	95

## Índice de tablas

Tabla 1: Caso de uso: Operador del sistema.....	25
Tabla 2: Caso de uso: Participante.....	26
Tabla 3: Caso de uso: Especialista.....	27
Tabla 4: Datos que el prototipo debe registrar.....	29
Tabla 5: Articuciones evaluadas y sus movimientos.....	31
Tabla 6: Asignación de nombres a las clases definidas.....	33
Tabla 7: Versiones de herramientas utilizadas.....	43
Tabla 8: Coeficientes calculados para el filtro pasa bajas.....	53
Tabla 9: Valores de interpretación ICC.....	63
Tabla 10: Articuciones y movimientos considerados en el experimento uno.....	65
Tabla 11: Resultados de la parte uno del experimento.....	67
Tabla 12: Articuciones y movimientos considerados en el experimentos formal.....	69
Tabla 13: Promedios de las medidas de cada especialista.....	70
Tabla 14: Comparación entre el especialista uno y el especialista dos.....	71
Tabla 15: Comparación entre el especialista uno y el especialista tres.....	71
Tabla 16: Comparación entre el especialista dos y el especialista tres.....	71
Tabla 17: Resultados del ICC para la validez de los datos.....	72
Tabla 18: Representación de un caso de uso.....	84

# ***Capítulo 1: Introducción***

---

La goniometría es la disciplina que se encarga de la medición de los ángulos en general [Taboadela, C. 2007] y puede aplicarse a campos como la veterinaria [Jeff Kramer. 2012] y la medicina [Norkin, C. C. 2009]. Cuando se aplica en el campo de la medicina, se encarga de la medición de los ROMs de las articulaciones del cuerpo humano. Estos ángulos son creados por la intersección de los ejes longitudinales de los huesos a nivel de las articulaciones [Taboadela, C. 2007]. También se utiliza en varias especialidades de la medicina como Traumatología y Ortopedia, Reumatología, Fisiatría, Rehabilitación y Terapia Física, entre otras.

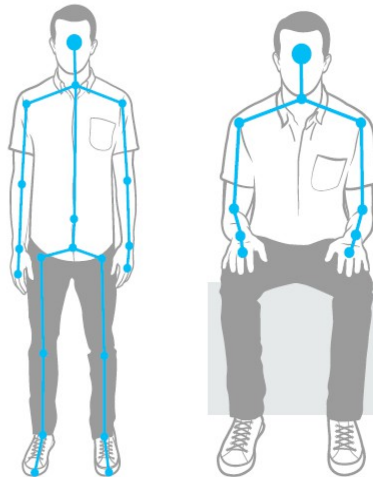
La técnica tradicional para realizar las medidas consiste en un método que hace uso de un dispositivo de medición denominado goniómetro [Fernández, S. S. 1991]. Este método es el más extendido en el ámbito clínico, sin embargo, presenta la desventaja de que el resultado final depende de la interpretación y habilidad del médico tratante [Norkin, C. C. 2009]. Estas dependencias pueden llegar a ser motivo de discusiones y desacuerdos entre los especialistas, sobre todo en evaluación de incapacidades y medicina legal [Taboadela, C. 2007]. Además, la utilización del goniómetro requiere entrenamiento y habilidad por parte del evaluador, lo cual, en muchas ocasiones, no es posible o no se le da la importancia necesaria, lo que provoca que los resultados de las mediciones entre distintos especialistas sean inconsistentes [Deusen, J. V. 1997].

Otros métodos que se utilizan en la medición de los ROMs son el uso de radiografías o pantallas radioscópias, las cuales son más exactas que el goniómetro, sin embargo, requieren que tanto el examinado como el examinador estén expuestos a radiación por rayos X, por lo tanto, su uso se reserva a casos especiales [Taboadela, C. 2007].

Como se comenta en [Deusen, J. V. 1997], las medidas del ROM de una articulación proveen información para describir el estado, documentar cambios, explicar discapacidades y predecir resultados. Dada la importancia de estas medidas y de las limitaciones del método tradicional descrito en [Norkin, C. C. 2009], [Deusen, J. V. 1997] y [Taboadela, C. 2007] en esta tesis se sugiere el uso del sistema Kinect como instrumento para realizar las mediciones de los ROMs. A lo largo del documento, se le

denomina sistema Kinect al dispositivo empleado por Microsoft como control de su consola de video juegos Xbox 360, sin considerar el software necesario para su utilización. El sistema Kinect fue presentado en el mercado por la empresa Microsoft el 4 de Noviembre de 2010 [Melgar, E. R. 2012]. Este sistema tiene la capacidad de detectar distintas articulaciones del cuerpo humano a partir de la imagen capturada, con la ventaja de que no utiliza ningún método invasivo al usuario (es decir no requiere el uso de marcadores o algún otro sensor adherido al cuerpo). Adicionalmente, el sistema Kinect no requiere un proceso de calibración complejo para ser utilizado, ni tampoco, un ambiente controlado. En la Figura 1 se muestran las articulaciones que el sistema Kinect es capaz de detectar [HIG. 2012].

Dadas las características del sistema Kinect, en esta tesis se propone, diseña, desarrolla y evalúa un prototipo de goniómetro digital que sirva a los especialistas como herramienta de apoyo para la medición de los ROMS de un paciente. De esta manera se pretende que la medición sea independiente de la interpretación y forma de medir de cada especialista.



*Figura 1: Articulaciones detectadas por Kinect.[HIG. 2012]*

## **1.1 Estado del arte**

Desde la aparición del sistema Kinect en noviembre de 2010 se han desarrollado muchos proyectos a su alrededor tales como los presentados por [Weerasinghe, T. 2012], [Izadi, S. 2012], [Rydén, F. 2011] que son relativos a varias áreas de investigación. En los trabajos relativos a ciencias medicas, LaBelle [LaBelle, K. 2011] hace un estudio para determinar

si el sistema Kinect es apto para ser utilizado en terapias de rehabilitación, así como las limitaciones que pueda presentar el dispositivo. También realizó un análisis comparativo entre las librerías de programación disponibles (Diciembre de 2011) para trabajar con el sistema Kinect, entre ellas analizó las librerías OpenNI (código libre) y Microsoft SDK (código propietario). El estudio de LaBelle concluye que la librería de software libre OpenNI tiene mejores características relativas al trabajo de detección del usuario y sus articulaciones, todo esto en comparación con la librería SDK de Microsoft. LaBelle concluye que el sistema Kinect puede ser usado en rehabilitación, sin embargo, no hace comparaciones de los datos obtenidos con el sistema Kinect contra los obtenidos con otras técnicas para evaluar la validez y confiabilidad de dichas medidas, tal y como se realiza en esta tesis.

Otro trabajo basado en el sistema Kinect es el descrito en [Padilha, A. 2011] que combinó dicho sistema con sensores inerciales tales como acelerómetros y giroscopios para aplicaciones en rehabilitación robótica y dispositivos de ayuda. En dicho trabajo se utiliza una calibración basada en filtros de Kalman para cada medición hecha por el sistema Kinect. El método es evaluado en sujetos sanos realizando distintas tareas. Padilha [Padilha, A. 2011] evidencia varios detalles del funcionamiento del sistema Kinect tales como el limitado espacio de trabajo, los errores presentes al detectar a más de una persona en el espacio de trabajo y los errores de detección cuando los objetos de estudio realizan movimientos rápidos. Sin embargo, también se concluye que el sistema Kinect tiene buen rendimiento al ser combinado con acelerómetros y giroscopios. Al momento de escribir el artículo, el sistema aún no había sido probado en situaciones clínicas para evaluar su rendimiento.

Los datos obtenidos mediante la esqueletización o la detección del cuerpo humano han sido evaluados en el trabajo presentado por [Obdrzalek, S. y Kurillo, G. 2012] los cuales analizaron la validez y confiabilidad respecto a la orientación y la oclusión del sujeto detectado. La evaluación se realizó mediante seis ejercicios físicos para determinar la exactitud del sistema. Se concluye que el sistema Kinect realiza una correcta esqueletización del cuerpo humano y que puede ser utilizada en aplicaciones orientadas a la salud.

Ben Bockstege en su trabajo de investigación [Bockstege, B. 2011] propone una serie de estudios para evaluar la precisión de los datos obtenidos con el sistema Kinect empleando la librería de código abierto OpenNI. Con estos estudios, Bockstege pretende verificar cuál es el comportamiento del dispositivo bajo una variedad de circunstancias tales como la detección del usuario, identificar sus articulaciones y el comportamiento cuando otro usuario entra o sale del espacio de trabajo. Los resultados de estos estudios se muestran en un reporte realizado por el mismo autor en [Bockstege, B. 2011] donde se enfoca en dos puntos principalmente que son: las tramas por segundo (FPS) y la velocidad a la cual el Kinect es capaz de enviar datos al disco duro. El autor concluye que, para estos dos

aspectos, se obtiene un mejor rendimiento trabajando en el sistema operativo Linux Ubuntu seguido por Windows 7, dejando atrás a MacOSX para el cual las librerías de OpenNI no son totalmente compatibles.

El trabajo publicado en [Pastor, I 2012] presenta un dispositivo de bajo costo que utiliza el sistema Kinect para la rehabilitación, basándose en un juego, para ayudar en el tratamiento de extremidades superiores. En este trabajo es necesario el uso de un filtro de Kalman para evitar la variación de los datos. Con este juego se evalúa la velocidad de los movimientos del paciente, la cual es proporcional a la puntuación que obtiene. Una conclusión importante a la que se llega es que los pacientes encontraron el sistema fácil de utilizar y por tal motivo tienen la disponibilidad para utilizarlo, tanto en el consultorio como en su propia casa, aumentando así las probabilidades de que el paciente haga un buen seguimiento de su tratamiento.

Por otro lado, con el desarrollo de la tecnología de los dispositivos móviles han surgido aplicaciones para ser utilizadas como goniómetros digitales, por ejemplo, drGoniometer [DrGoniometer. 2012], PhotoGoniometer [Stockholm, R. 2012] e iGonio [Zemirline, A. 2011]. El objetivo de estas aplicaciones consiste en calcular el ROM de una articulación a partir de una fotografía tomada al paciente en una posición determinada. Posteriormente, sobre esta foto, el usuario coloca manualmente un conjunto de marcadores en los puntos de interés para la medición de la articulación. Por ejemplo, para el DrGoniometer se deben colocar tres marcas para los casos de rodillas y codos como se muestra en la Figura 2.



*Figura 2: Cálculo de ROM con DrGoniometer. [DrGoniometer. 2012]*

En la Figura 2 se puede apreciar que los marcadores colocados sobre la foto forman líneas, entonces, empleando técnicas de trigonometría, la aplicación puede determinar el ángulo de flexión o extensión de la articulación fotografiada. En [Ferriero, G. y Sartorio,

F 2011] se realiza una evaluación de la confiabilidad de las medidas obtenidas con el DrGoniometer en comparación con un goniómetro universal. La articulación evaluada en esta prueba fue la del codo, se tomaron veintiocho fotografías de sujetos sanos, los evaluadores participantes fueron siete expertos de dos instituciones distintas. Aunque los resultados son aceptables, el mismo artículo comenta que no pueden ser generalizables, debido a que los experimentos se hicieron con sujetos sanos, por lo tanto los posicionamientos para realizar las evaluaciones no presentaron ninguna complicación como posiblemente pudiera presentarse en sujetos con alguna deformación, enfermedad o incluso sujetos que no puedan adoptar las posiciones deseadas.

En los trabajos revisados, no hay registro de investigación orientada a medir la validez y confiabilidad de los arcos de movimiento obtenidos mediante el sistema Kinect, pensando en su uso como goniómetro digital.

## **1.2 Planteamiento del problema**

La forma tradicional en que los especialistas obtienen la medida del ROM de la articulación de un paciente es empleando un goniómetro universal. Para llevar a cabo esta actividad, se requiere cierta habilidad y entrenamiento por parte de la persona que realiza la medición. Por ejemplo, en [Rheault, 1988] se describen las inconsistencias que pueden existir con el uso del goniómetro, las cuales pueden ser debidas a diferencias en la técnica de medición, a los mismos pacientes o a la posición del goniómetro. Además, la forma en que se realiza la medición debe seguir un método definido y estandarizado para obtener un resultado con la validez y confiabilidad requerida por los especialistas para emitir un diagnóstico. En [Norkin, C. C. 2009], [Taboadela, C. 2007] y en [Deusen, J. V. 1997] se describen métodos y técnicas para la medición goniométrica correcta. En cualquier caso, el uso correcto del goniómetro está sujeto a la habilidad y destreza de los especialistas, por lo que las medidas pueden variar según el método utilizado y del especialista que las realiza, además de que, el proceso de medición puede requerir mucho tiempo en relación con el tiempo que dura una consulta y en ocasiones se convierte en una actividad tediosa originando cansancio físico tanto en el paciente como en el especialista. Varios intentos se han hecho para utilizar otros dispositivos tales como radiografías, fotografías [Norkin, C. C. 2009] o el uso de otros instrumentos como el inclinómetro [Taboadela, C. 2007], el cual, es utilizado para articulaciones de la espalda donde el uso de un goniómetro para realizar las mediciones puede ser complicado. Cada uno de los instrumentos tiene distintos grados de precisión y facilidad de uso.

En esta tesis se propone un prototipo de goniómetro digital utilizando el sistema Kinect y una computadora para realizar las mediciones de los ROMs y que ayude al especialista a automatizar el proceso. A lo largo del documento le llamaremos prototipo de goniómetro digital o simplemente prototipo al conjunto de elementos que lo componen, es decir:



computadora, software desarrollado, librerías y sistema Kinect. Se utilizan los datos relativos a las posiciones de las articulaciones de los pacientes, obtenidas a través de la cámara del sistema Kinect, para generar un conjunto de vectores que representan las posiciones y orientaciones de las articulaciones del miembro que se desea medir. Empleando dichos vectores se calcula el ángulo de la articulación, todo ello sin necesidad de que el paciente lleve consigo marcadores, sensores o aparatos adheridos al cuerpo. Con el prototipo desarrollado en esta tesis, se pretende evaluar la validez y confiabilidad de las medidas y que estas sean homogéneas e independientes de la destreza del especialista y del método empleado, ya que serán calculadas bajo el mismo criterio.

### **1.3 Hipótesis**

Las mediciones de las articulaciones del cuerpo humano obtenidas empleando el sistema Kinect tienen la validez y confiabilidad necesarias para ser utilizadas para la medición clínica de ROMs.

### **1.4 Alcance**

En esta tesis se presenta el prototipo de un goniómetro digital, empleando una computadora y el sistema Kinect de Microsoft para realizar mediciones de los ROMs de las articulaciones, con el fin de evaluar la validez y confiabilidad de las medidas obtenidas. Como propuesta inicial, el sistema contempla únicamente las mediciones de algunos ROMs relacionadas con las articulaciones de los hombros, codos y cadera, que son soportadas por el sistema Kinect y que permitirán evaluar su validez y confiabilidad. El prototipo solo evalúa el ROM de la articulación y no se realiza ninguna medición ni evaluación respecto al rango de fuerza empleada para los movimientos, es decir, se realizará únicamente la medición activa del ROM [Deusen, J. V. 1997] y [Taboadela, C. 2007] para lo cual se utilizará el método *cero neutro* descrito en el trabajo de [Taboadela, C. 2007]. Las medidas realizadas servirán para verificar el ROM que los participantes evaluados son capaces de lograr sin intervención externa [Norkin, C. C. 2009].

La evaluación de las medidas se hace utilizando alguna de las librerías disponibles para trabajar con los datos que el sistema Kinect proporciona, la librería elegida se utiliza tal y como se ofrece, sin que en esta tesis se pretenda hacer modificaciones o mejoras a la misma.

## **1.5 Objetivo principal**

Diseñar e implementar un prototipo de un goniómetro digital empleando una computadora y el sistema Kinect de Microsoft.

## **1.6 Objetivos secundarios**

1. Determinar las limitaciones del sistema Kinect para su uso como goniómetro.
2. Determinar los ROMs que se pueden medir con el sistema Kinect.
3. Diseñar un prototipo de un goniómetro digital que evite el uso de métodos invasivos para llevar a cabo las mediciones del ROM de una articulación.
4. Evaluar la validez y confiabilidad de las mediciones del ROM de una articulación, empleando el sistema Kinect, en comparación con el método tradicional.
5. Implementar una aplicación prototipo, con la cual sea posible homogeneizar la medición del ROM de la articulación de un paciente, de tal manera que las mediciones sean independientes de la habilidad y experiencia del especialista que la utilice.

## **1.7 Contenido**

El contenido de este documento inicia con el presente capítulo, donde se mencionan los antecedentes de los que surge esta tesis, se presenta el planteamiento del problema que se aborda y se expone una hipótesis. Finalmente se describen los objetivos que se pretenden alcanzar.

En el segundo capítulo, se presentan los conceptos teóricos necesarios para realizar una medición goniométrica, la cual, es la base para plantear el proceso al que debe apegarse el prototipo de goniómetro digital implementado.

En el tercer capítulo, se identifican y explican los requerimientos que el prototipo de goniómetro digital debe cumplir, para satisfacer los objetivos planteados y para obtener la información necesaria, con la cual, se responde a la pregunta planteada en la hipótesis.

En el cuarto capítulo, se describe el proceso el diseño del prototipo, indicando el cómo se implementa cada elemento del sistema. También en este capítulo se define el hardware y software con que se construye el prototipo.

El quinto capítulo, describe las fases de la implementación del prototipo, con base en el análisis y diseño desarrollados en los capítulos anteriores.

En el sexto capítulo, se hace una descripción de los experimentos realizados para evaluar la confiabilidad y validez de las mediciones de ROMs mediante el prototipo.

Por último, en el séptimo capítulo, se muestran los resultados obtenidos junto con las conclusiones, en base a la hipótesis y a los objetivos planteados. Así mismo se describen los principales aportes de esta tesis y se presentan líneas de investigación para trabajo futuro.

Por otra parte, al final del documento, se presentan varios anexos, donde se describen brevemente algunas de las herramientas utilizadas en el desarrollo de esta tesis.

## Capítulo 2: Goniometría

Como se describe en [Norkin, C. C. 2009], las medidas del ROM de una articulación, son un importante componente dentro de la examen físico de las extremidades del cuerpo humano, con el cuál, se pueden identificar incapacidades y apoyar la evaluación del estado físico de un paciente por parte del médico o especialista. La palabra goniometría se puede definir como medición de ángulos ya que deriva de los términos griegos *gono* que significa ángulo y *metria* que significa medida, en el contexto de ciencias de la salud se refiere a la medición de los ángulos formados por las articulaciones del cuerpo humano. Comúnmente las mediciones se toman con un instrumento denominado goniómetro. El examinador obtiene el ángulo poniendo las partes de este instrumento a lo largo de los huesos proximal y distal de la articulación que será evaluada, como se muestra en la Figura 3.

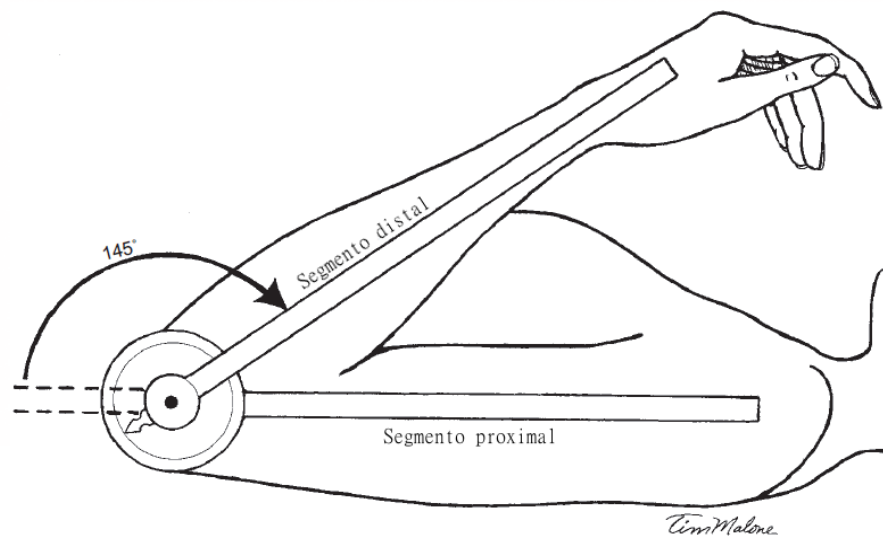


Figura 3: Posición del goniómetro en la articulación del codo. Modificado de [Norkin, C. C. 2009]

La goniometría se utiliza para medir y documentar la cantidad de movimiento *activo*<sup>3</sup> y *pasivo*<sup>4</sup>. Al inicio de la evaluación, el especialista indica al paciente que realice un movimiento activo de su articulación, en caso de que se descubra alguna anormalidad, el examinador realiza un movimiento pasivo para evaluar tejido y detectar dolor, así como para estimar la cantidad de movimiento.

La goniometría puede ayudar en el examen físico para:

- Determinar la presencia o ausencia de discapacidades.
- Establecer diagnósticos.
- Desarrollar un diagnóstico, metas del tratamiento y planes de cuidado.
- Evaluar el progreso de rehabilitación.
- Modificar el tratamiento.
- Motivar al paciente.
- Investigar la efectividad del tratamiento o técnica terapéutica.
- Fabricación de equipo de rehabilitación.

En [Taboadela, C. 2007] se menciona que, en el campo de la medicina, la goniometría tiene dos objetivos principales:

1. Evaluar la posición de una articulación en el espacio. El cual se utiliza para cuantificar la ausencia de movilidad de una articulación.
2. Evaluar el ROM de una articulación en cada uno de los tres planos del espacio. Se utiliza para cuantificar la movilidad de una articulación.

Debido a que uno de los objetivos del prototipo propuesto es la evaluación de la validez y confiabilidad del ROM de una articulación, esta tesis se centra en el segundo objetivo mencionado en [Taboadela, C. 2007], que utiliza el concepto de *posición neutra o posición cero* descrito en la sección 2.1.2.

## 2.1 Mediciones goniométricas

Para una adecuada evaluación de los arcos de movimiento, el examinador debe contar con conocimiento sobre:

1. Estructura y función de las articulaciones
2. Rango normal de movimientos

---

<sup>3</sup> Movimiento activo.- Lo realiza el paciente sin intervención del médico o especialista.

<sup>4</sup> Movimiento pasivo.- El especialista interviene para ayudar al paciente a realizar el movimiento correctamente.

3. Posiciones de ensayo
4. Estabilización requerida
5. Referencias anatómicas
6. Alineación de instrumentos

Además, el examinador debe desarrollar las siguientes técnicas:

1. Posicionar y estabilizar correctamente al paciente.
2. Mover una parte del cuerpo del paciente de acuerdo con el ROM apropiado.
3. Determinar apropiadamente el fin del ROM que se mide.
4. Localizar adecuadamente la marca del cuerpo del paciente con la que se realiza la medición.
5. Alinear adecuadamente el instrumento de medida (goniómetro) con las partes del cuerpo del paciente con las que se hace la evaluación.
6. Leer apropiadamente la medida que indica el instrumento de medición.
7. Registrar las medidas adecuadamente.

Así mismo, es importante comentar que cada movimiento depende de varios factores entre los que se incluyen:

1. Estado de conciencia. Se pueden dividir en dos partes:
  - *Movimientos activos*: movimientos que solo son posibles en personas conscientes.
  - *Movimientos pasivos*: movimientos que no requieren que las personas estén conscientes.
2. Características individuales.
  - Edad
  - Sexo
  - Cultura
  - Entrenamiento
  - Complexión física
3. Presencia de patologías.
  - Artritis
  - Fracturas
  - Malformaciones congénitas
  - Deformidades
  - Lesiones deportivas
  - Síndrome de inmovilismo
  - Secuelas de hemiplejía

### 2.1.1 Planimetría

La planimetría es la descripción de los planos imaginarios que sirven de referencia para dividir el cuerpo humano en diferentes zonas y facilitar su estudio. En el cuerpo humano, se reconocen tres planos perpendiculares entre sí: plano sagital, plano frontal o coronal y plano transversal o axial. Como se muestra en la Figura 4, cada uno de estos planos son cruzados perpendicularmente por un eje: eje mediolateral, eje anteroposterior y eje vertical respectivamente. Sobre estos tres ejes, se producen los movimientos articulares.

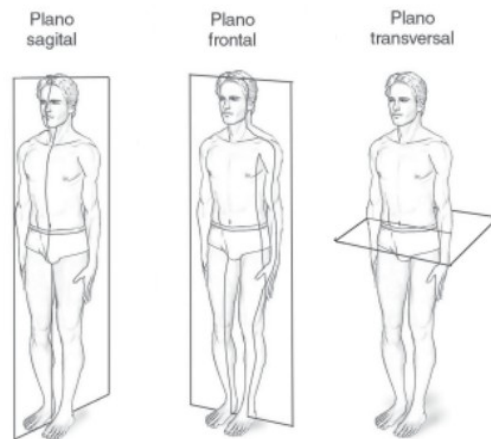
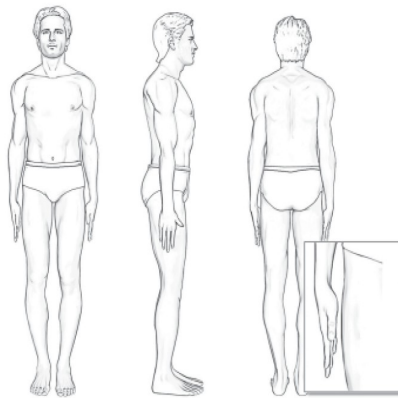


Figura 4: Planos del cuerpo  
[Taboadela, C. 2007]

El posicionamiento del paciente para la toma de las medidas es fundamental para la goniometría, ya que es usado para colocar las articulaciones en una posición cero neutro y ayuda a estabilizar el segmento proximal de la articulación. El posicionamiento afecta la cantidad de tensión en el tejido blando alrededor de la articulación. Un examen en el cual una o más estructuras de tejido están tensas, resulta en un ROM más limitado que un examen en el que el tejido se encuentra relajado. Como se explica en [Norkin, C. C. 2009] el uso de diferentes posiciones al realizar el examen altera el ROM obtenido. Por lo tanto es importante que los examinadores utilicen la misma posición durante sucesivas mediciones del ROM de la articulación, de esta manera, la comparación entre ROMs medidos en la misma posición entregan resultados similares. Si la posición entre medidas sucesivas cambia, no hay una base de comparación entre ellas.

## **2.1.2 Posición neutra o posición cero**

La posición neutra, también conocida como posición cero, es una posición humana de referencia que se adopta como punto de inicio para realizar la medición goniométrica. En la posición neutra, el individuo se encuentra parado con la mirada hacia delante, los brazos colgando al costado del cuerpo, los pulgares dirigidos hacia delante y los miembros inferiores uno al lado del otro con las rodillas en extensión completa, con los ejes de los pies paralelos y separados por un espacio igual a la distancia entre ambas caderas, ver Figura 5.



*Figura 5: Posición neutra o posición cero [Taboadela, C. 2007]*

Las posiciones para la toma de ROMs están diseñadas para permitir los siguientes aspectos:

- Poner la articulación en una posición cero o de cero grados.
- Permitir un movimiento completo del ROM.
- Proveer estabilidad para el segmento proximal a la articulación.

El examinador debe describir detalladamente, en el registro médico del paciente, la posición de medición tomada, para que sea la misma utilizada en los siguientes exámenes de dicho paciente. En [Norkin, C. C. 2009] y en [Taboadela, C. 2007] se da una lista de las posiciones recomendadas para cada articulación y tipo de movimiento.

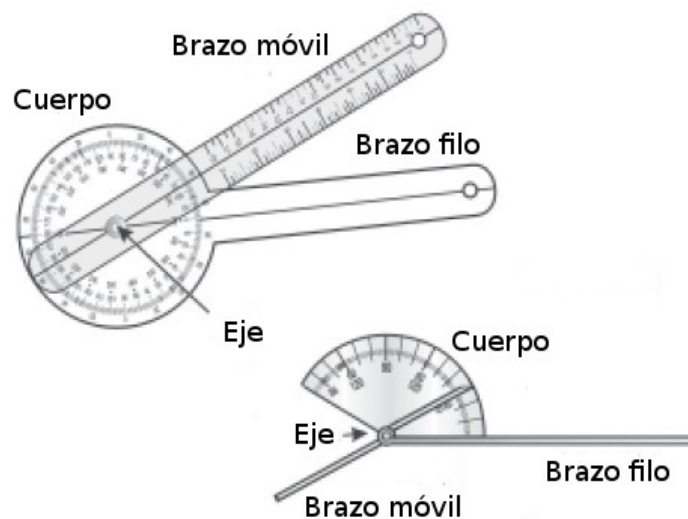
Una posición adecuada contribuye a que el movimiento de la articulación pueda aislarse, lo cual ayuda a asegurar que la medida sea real para la articulación evaluada en lugar de una combinación de movimientos de diversas articulaciones.



Para la mayoría de las mediciones será suficiente con la estabilización manual que haga el examinador para el correcto examen, sin embargo, aprender como posicionar al sujeto medido requiere práctica, ya que el examinador debe realizar esta tarea mientras, simultáneamente, mueve el segmento distal del goniómetro para tomar la medida. Para algunas articulaciones es necesario contar con una persona que ayude al examinador a realizar un correcto examen. En [Norkin, C. C. 2009] se dan ejemplos y guías de como aprender a estabilizar correctamente al paciente para la toma adecuada del ROM.

## 2.2 Instrumentos de medición

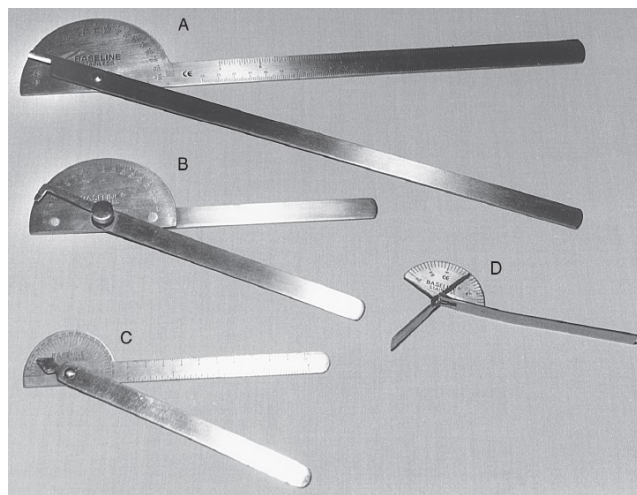
Hay varios instrumentos utilizados para obtener la medida del ROM de una articulación. Estos van desde simples trazos en papel hasta electrogoniómetros y sistemas de análisis de movimientos. El examinador puede elegir alguna de las herramientas mencionadas basándose en aspectos tales como el motivo de la medición (clínica o de investigación), el movimiento y la articulación, así como la validez, confiabilidad, costo, facilidad de uso y tamaño del instrumento.



*Figura 6: Goniómetro universal [Taboadela, C. 2007]*

## 2.2.1 Goniómetro

El goniómetro universal es el instrumento más utilizado para medir los ROMs en el área clínica [Norkin, C. C. 2009]. Puede ser utilizado en casi todas las articulaciones del cuerpo del paciente. Generalmente, el goniómetro es producido en plástico o metal y se hacen de diferentes tamaños y formas pero basados en el mismo diseño el cual incluye el cuerpo del goniómetro y dos extensiones llamadas brazos. En la Figura 6 se muestra el goniómetro universal donde se pueden ver cada una de las partes que lo componen y en la Figura 7 se muestran algunos tipos de goniómetros metálicos [Norkin, C. C. 2009].



*Figura 7: Goniómetros metálicos de distintos tamaños [Norkin, C. C. 2009]*

Las medidas soportadas por el goniómetro pueden variar, pero típicamente van de 0 a 180 grados o de 0 a 360 grados con escalas de 1 a 10 grados o de 1 a 5 grados. Los brazos del goniómetro pueden variar de 1 a 14 pulgadas de longitud para adaptarlo al tamaño de las articulaciones que se pretende medir. Cada brazo del goniómetro se fija a las partes distal y proximal de la articulación para realizar la medida deseada. En la Figura 8 se muestra el posicionamiento del goniómetro universal para medir el ROM de la articulación del codo.



*Figura 8: Brazos distal y proximal a la articulación [Norkin, C. C. 2009]*

## **2.2.2 Electrogoniómetro**

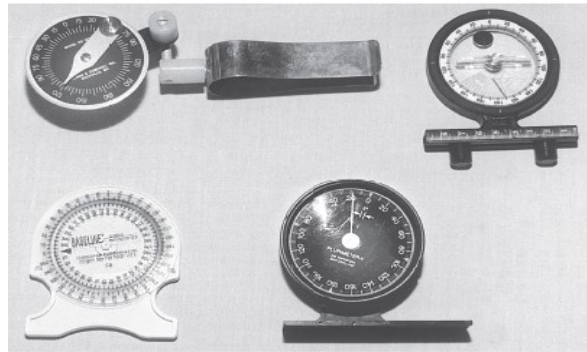
Los electrogoniómetros son sofisticados instrumentos electrónicos de alto costo que utilizan electrodos a nivel del eje, del brazo proximal y distal, y que registran la medición a través de un software en la pantalla de una computadora. Se utilizan fundamentalmente para investigación [Taboadela, C. 2007]. En la Figura 9 se muestra un electrogoniómetro colocado en la pierna de un paciente.



*Figura 9: Electrogoniómetro [Taboadela, C. 2007]*

### **2.2.3 Inclinómetro**

El inclinómetro es un instrumento de medición de ángulos que se utiliza cuando no es posible aplicar correctamente el goniómetro, como en la medición de la flexión-extensión de la columna lumbar, o bien, cuando se dificulta la localización de reparos óseos<sup>5</sup> [Taboadela, C. 2007]. El inclinómetro es un tipo de goniómetro que utiliza la fuerza de gravedad como punto de referencia para su calibración. De esta manera, la posición inicial de medición no depende de la apreciación visual, como sucede con el goniómetro, y puede ser repetida sin problemas, debido a que la fuerza de la gravedad es una constante [Taboadela, C. 2007]. En la Figura 10 se muestran distintos tipos de inclinómetros.



*Figura 10: Distintos modelos de inclinómetros  
[Norkin, C. C. 2009]*

## **2.3 Registro de mediciones**

Las mediciones realizadas se registran de distintas formas como las mencionadas en [Norkin, C. C. 2009] y en [Taboadela, C. 2007]. Sin importar qué método se elija, este debe proporcionar suficiente información para permitir la adecuada interpretación de las medidas. El registro debe contener los siguientes datos:

1. Nombre, edad y genero del paciente.
2. Nombre del examinador.
3. Día y hora de la medición.
4. Tipo de goniómetro utilizado.
5. Parte del cuerpo, medición y movimiento evaluado.

<sup>5</sup> Los reparos anatómicos óseos son eminencias óseas palpables que se utilizan para la alineación de los brazos del goniómetro [Taboadela, C. 2007].

6. ROM.
7. Si el movimiento es activo o pasivo.
8. Información subjetiva como incomodidad o dolor durante el experimento.
9. Información objetiva, obtenida por el examinador durante la prueba, tal como espasmo muscular protector<sup>6</sup>.
10. Una descripción completa de cualquier desviación de las posiciones recomendadas para la realización de las pruebas.

Para determinar si el ROM es normal, se compara con valores de ROM de gente con la misma edad y género y con estudios realizados bajo el mismo método. Los registros deben incluir la posición inicial y final de la prueba.

## **2.4 Procedimientos**

Los autores difieren sobre los pasos a realizar en el examen goniométrico, ejemplos de ellos se pueden encontrar en [Norkin, C. C. 2009] y [Taboadela, C. 2007]. Como se indica en [Taboadela, C. 2007], antes de que inicie una evaluación goniométrica, el examinador debe realizar los siguientes pasos:

1. Determinar las articulaciones y movimientos que serán evaluados.
2. Definir la secuencia de la prueba según los movimientos.
3. Asegurarse que cuenta con el equipo necesario como goniómetros, toallas, y formatos para registrar los datos obtenidos.
4. Explicar al paciente la forma en que se realiza la prueba.
  - a) Explicar el propósito de la prueba.
  - b) Mostrar y explicar el goniómetro.
  - c) Mostrar y explicar los ejes del cuerpo que se utilizarán.
  - d) Explicar y demostrar las posiciones para la prueba.
  - e) Explicar y demostrar el rol del examinador y examinado.
  - f) Confirmar que el paciente ha comprendido la explicación.

El examinador debe emplear términos que el paciente pueda comprender fácilmente, así mismo, debe intentar tener una relación de confianza para que el paciente se sienta motivado a realizar las pruebas.

Como se detalla en [Norkin, C. C. 2009], una vez iniciado el procedimiento, los pasos a seguir son los siguientes:

---

<sup>6</sup> Reflejo que inmoviliza de forma natural una región, para evitar cualquier movimiento que pueda causar una irritación adicional de la estructura lesionada [GF, 2014].

1. Colocar al paciente en la posición de prueba.
2. Estabilizar el segmento proximal de la articulación.
3. Mover el segmento distal a la posición cero. Lentamente mover el segmento distal al final de un movimiento pasivo para determinar hasta donde lo puede mover el paciente sin presentar dolor o molestias.
4. Hacer una estimación visual de la ROM
5. Regresar el movimiento distal a la posición de inicio.
6. Palpar las marcas anatómicas.
7. Alinear el goniómetro.
8. Registrar la posición de inicio y remover el goniómetro.
9. Estabilizar el segmento proximal.
10. Mover el segmento distal por todo el rango de movimiento.
11. Re-alinear el goniómetro. Si es necesario, palpar de nuevo para encontrar las marcas anatómicas.
12. Registrar el ROM que marca el goniómetro.

## ***Capítulo 3: Análisis del prototipo***

---

Los sistemas se desarrollan con distintos propósitos y de acuerdo a ciertas necesidades. El análisis de sistema consiste en comprender y especificar en detalle qué información debe ser manejada [Satzinger, J. 2010].

Para llevar a cabo el proceso de desarrollo de software, que incluye análisis, diseño y desarrollo, esta tesis se basa en el estándar UML (Unified Modeling Language) que se describe en [Satzinger, J. 2010] y [Deitel, Paul 2012], así mismo, en el anexo A se da una breve descripción de este estándar.

### **3.1 Análisis del problema**

Como se ha comentado, esta tesis nace de las necesidades y problemas planteados por los especialistas pertenecientes al Centro Médico “Lic. Adolfo López Mateos” (CMLALM). Además de que existe documentación que abala la presente línea de investigación como se detalla en [Taboadela, C. 2007], [Norkin, C. C. 2009], [Rheault, 1988] y [Deusen, J. V. 1997] solo por mencionar algunos.

Una de las problemáticas expresadas por los especialistas es que, con frecuencia, un mismo paciente es atendido por distintos especialistas, lo que suele ocasionar que las medidas y los registros se hagan de manera distinta o empleando diferentes técnicas, incluso tomando la misma medida con el paciente en distinta posición. Esto provoca que las medidas tomadas y el seguimiento en la rehabilitación del paciente presente inconsistencias. Dadas estas desventajas en el método tradicional empleado por los especialistas, se propone el diseño de un goniómetro digital que ayude a evitar esta problemática.

### **3.1.1 Inconvenientes detectados**

Los principales inconvenientes detectados, según [Norkin, C. C. 2009] y [Rheault, 1988] y confirmados por los especialistas del CMLALM, al realizar mediciones con el goniómetro universal son los siguientes:

- Es muy frecuente que distintos especialistas tengan diferentes técnicas de medición.
- Aunque hay guías para la toma de medidas gonimétricas, se requiere que el especialista tenga habilidad, destreza y experiencia para hacerlas correctamente.
- Mal posicionamiento del goniómetro al realizar el examen físico.
- Puede ser tardado y tedioso.
- Para ciertas articulaciones se requiere la ayuda de otro especialista, para hacer la medida adecuadamente.
- Hay pacientes que no tienen una adecuada cooperación.

### **3.1.2 Situaciones susceptibles de mejora**

Aunque las siguientes no son precisamente problemas, se considera que se pueden hacer de mejor manera con el apoyo de la tecnología.

- Es complicado llevar un registro de las mediciones obtenidas mediante el goniómetro universal.
- Los registros de seguimiento en el tratamiento de un paciente algunas veces quedan incompletos.
- La posición del paciente al tomar la medida no se describe claramente.
- Ya que los registros son manuales resulta tardado y tedioso realizar estadísticas de ellos, para obtener una historia clínica de un paciente determinado.

### **3.1.3 Identificación de objetivos**

Esta parte del análisis se basa en la hipótesis y objetivos que se comentan en las secciones 1.3, 1.5 y 1.6 de este documento a partir de lo cual se definen los requerimientos necesarios.



## **3.2 Requerimientos**

El principal objetivo de esta tesis es la implementación de un prototipo de goniómetro digital, que utilice una computadora y un sistema Kinect y que además, permita la evaluación de la validez y la confiabilidad de las medidas que proporcione. De esta manera, se pueden establecer los siguientes requerimientos:

1. Para evaluar la confiabilidad de las medidas tomadas, el prototipo debe ser capaz de obtener repetidamente la medida bajo las mismas circunstancias y registrarla para su posterior evaluación.
2. El sistema no debe ser invasivo al participante medido.
3. Para determinar las limitaciones actuales del sistema Kinect como goniómetro digital, el prototipo desarrollado debe permitir evaluar la validez y confiabilidad de las medidas a distintas articulaciones del cuerpo del participante medido.
4. Evaluar los ROMs de distintas articulaciones y distintos movimientos para cada una de ellas.
5. Registrar las medidas tomadas por distintos especialistas para su posterior comparación.
6. Cuando sea posible<sup>7</sup>, el prototipo podrá tomar la misma medida con diferentes posturas del sujeto medido.

### **3.2.1 La interfaz de usuario**

La interfaz de usuario es el medio por el cual los usuarios del sistema interactúan con el prototipo, es por esto que requiere ser fácil e intuitiva. A continuación se presenta una serie de requerimientos que la interfaz de usuario debe cumplir:

1. Debe permitir la total visualización del esqueleto del usuario cuando este ha sido identificado por el sistema.
2. Debe permitir la captura de los datos de los especialistas y de los participantes.
3. Elegir participantes ya registrados. Si a un participante ya se le evaluó algún movimiento, ya no es necesario capturar sus datos nuevamente.
4. Tener una sección para elegir la articulación que se quiere evaluar.
5. Tener una sección que permita elegir el tipo de movimiento que se realiza en base al tipo de articulación elegido, por ejemplo, abducción, aducción, flexión, etc.
6. Tener una sección para elegir el lado del movimiento, por ejemplo, si la flexión del codo se hace con el codo izquierdo o el derecho.
7. Tener una sección para elegir la posición con las que se hace la evaluación, es decir si es de frente a la cámara, de perfil o sentado.

---

<sup>7</sup> Para algunas articulaciones y/o movimientos se requiere una posición específica[Norkin, C. C. 2009]

8. El sistema debe mostrar imágenes de la posición inicial y final, según sea el caso, que sirvan como guía para los tres actores: operador del sistema, participante y especialista.
9. Una sección para capturar o registrar la posición inicial del movimiento.
10. Una sección para capturar la posición final del movimiento.
11. Una sección para visualizar el ROM obtenido.
12. Con fines de experimentación, se requiere una sección para capturar la medida manual con el goniómetro universal.
13. Una guía gráfica que ayude al participante a mantener la posición adecuada durante todo el movimiento.

### **3.2.2 Secuencia de eventos**

A groso modo, los actores del proceso de medición deben seguir la siguiente secuencia de eventos:

1. El operador del sistema inicia la aplicación.
2. El participante se coloca de frente al sistema Kinect a la distancia indicada por el operador del sistema.
3. Cuando el sistema Kinect detecta al usuario, el operador del sistema captura los datos necesarios para el movimiento.
4. En base a las indicaciones del especialista, la articulación a medir y tipo de movimiento a realizar, el participante debe adoptar la posición inicial para el movimiento.
5. El operador del sistema registra la posición inicial.
6. En base a las indicaciones del especialista, la articulación a medir y tipo de movimiento a realizar, el participante adopta la posición final del movimiento.
7. El operador del sistema registra la posición final, el prototipo calcula y registra el ángulo medido.
8. El especialista hace la medición con el goniómetro universal y dicta la medida obtenida al operador del sistema.
9. El operador del sistema captura la medida manual que el especialista le ha indicado.
10. El operador del sistema guarda la información.

### **3.2.3 Diagramas de casos de uso**

De acuerdo con los requerimientos especificados anteriormente, el prototipo de goniómetro digital contiene tres actores.

1. Operador del sistema<sup>8</sup>.
2. Especialista que valida las posiciones.
3. Participante que será medido.

Los tres actores interactúan de distinta forma con el prototipo, según se ilustra en los siguientes casos de uso, en los que se muestra únicamente detalles superficiales de dicha interacción [Deitel, Paul 2012].

### 3.2.3.1 Caso de uso: Operador del sistema

El caso de uso para operador del sistema es el más extenso pues es quien tiene el control del mismo y elige cada una de las opciones. En una aplicación final, se elimina el operador de sistema, para que sea el especialista quien haga dicha tarea, sin embargo, para esta tesis interesa que, en la evaluación de la validez y confiabilidad del sistema, la forma de operarlo no sea una variable más, por lo tanto se fija a que una persona sea la encargada de realizar esta actividad durante el proceso de validación del prototipo.

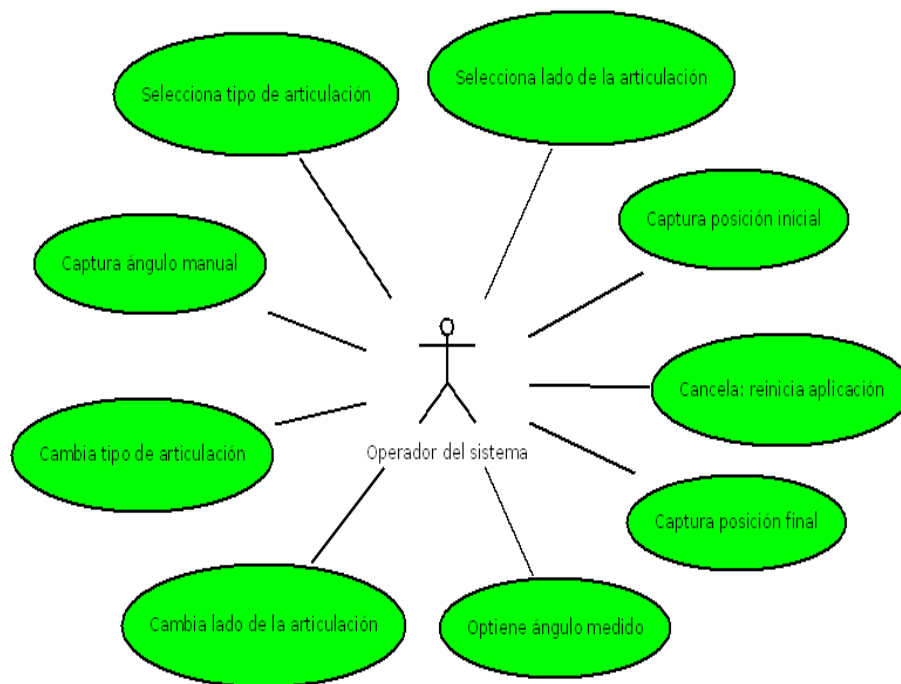


Figura 11: Caso de uso: Operador del sistema

En la Tabla 1 se describe cada actividad para el caso de uso *Operador del sistema* de la Figura 11.

<sup>8</sup> El operador del sistema es provisional y para efectos de evaluación del prototipo ya que si el especialista opera el sistema, se convierte en una variable más a considerar.

Caso de uso	Descripción
<b>Captura datos de especialistas</b>	Estos datos sirven para identificar al especialista que valida la medición.
<b>Captura datos de participantes</b>	Datos mínimos de identificación de los participantes, identificador, edad, sexo y peso.
<b>Elige especialista</b>	El sistema cuenta con información capturada de uno o más especialistas, se puede elegir al que realiza la medición.
<b>Elige participante</b>	El sistema cuenta con información capturada de uno o más participantes, se puede elegir al que se le realiza la medición.
<b>Elige tipo de articulación</b>	Lista de articulaciones disponibles para medir con el sistema.
<b>Elige movimiento</b>	Lista de movimientos disponibles para la articulación elegida.
<b>Elige lado de la articulación</b>	Si el movimiento lo requiere se elige si es del lado izquierdo o derecho del participante.
<b>Elige posición</b>	Se elige la posición que el movimiento requiere por ejemplo de frente a la cámara parado, de perfil o de frente sentado.
<b>Captura posición inicial</b>	Con el participante debidamente colocado, el operador del sistema captura la posición inicial.
<b>Captura posición final</b>	Una vez realizado el movimiento necesario para la toma de la medida, el operador del sistema captura la posición final.
<b>Obtiene ángulo Kinect</b>	Cuando se obtiene la posición final, el sistema calcula el ángulo medido y el operador lo guarda.
<b>Captura ángulo manual</b>	El especialista dicta al operador del sistema el ángulo que él obtuvo mediante el goniómetro universal.

Tabla 1: Caso de uso: Operador del sistema

3.2.3.2 Caso de uso: Participante

El actor *participante* representa al sujeto que es medido en alguna de sus articulaciones. Este actor es el detectado por la cámara. En la Figura 12 se muestra su diagrama de caso de uso.

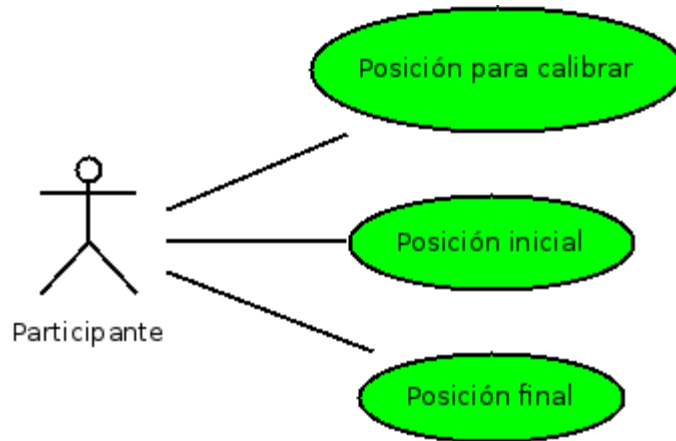


Figura 12: Caso de uso: Participante

En la Tabla 2 se describe cada actividad para el caso de uso *Participante* de la Figura 12.

Caso de uso	Descripción
<b>Posición para calibrar</b>	Con este caso de uso se inicia el proceso de detección por parte del sistema Kinect. El participante debe hacer los movimientos necesarios para adoptar la posición correcta y termina cuando el sistema Kinect lo ha detectado correctamente.
<b>Posición inicial</b>	Esta actividad depende del caso de uso anterior y determina la postura que el participante debe adoptar para comenzar la prueba goniométrica con el sistema Kinect. Depende de la articulación, movimiento, lado y posición que se desea evaluar.
<b>Posición final</b>	Esta actividad depende de los dos casos de uso anteriores y determina la postura que el participante debe adoptar para terminar la prueba goniométrica con el sistema Kinect. Al igual que la anterior también depende de la articulación, movimiento, lado y posición que se desea evaluar.

Tabla 2: Caso de uso: Participante

3.2.3.3 Caso de uso: Especialista

En la Figura 13 se muestra el caso de uso para el actor *especialista*.

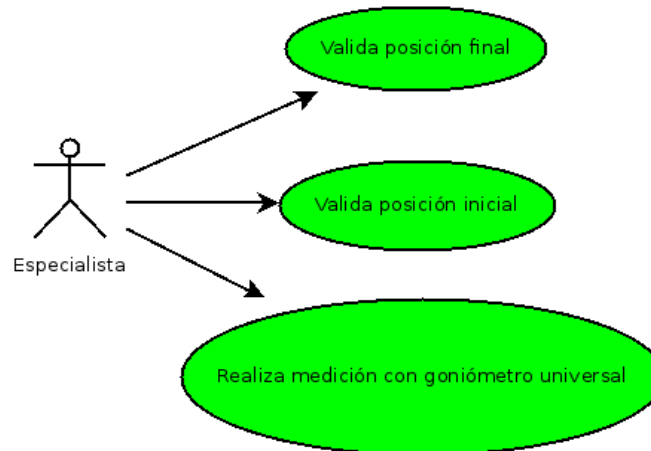


Figura 13: Caso de uso: Especialista

En la Tabla 3 se describe cada actividad para el caso de uso *Especialista* de la Figura 13.

Caso de uso	Descripción
<b>Valida posición inicial</b>	Una vez que el participante es detectado y adopta la posición inicial, el especialista se encarga de validar dicha posición para la correcta toma de mediciones.
<b>Valida posición final</b>	Una vez que el participante es detectado y adopta la posición final, el especialista se encarga de validar dicha posición para la correcta toma de mediciones.
<b>Realiza medición con goniómetro universal</b>	Cuando se ha concluido la toma de la medida con el prototipo, el especialista mide el mismo ROM con un goniómetro universal y se la dicta al operador del sistema para que se realice el registro de la misma.

Tabla 3: Caso de uso: Especialista

### 3.2.4 Definición de los datos

Como se describe en [Taboadela, C. 2007], el registro de la medición debe incluir: nombre, edad y sexo del examinado, así como la fecha, el nombre del examinador y el tipo de goniómetro utilizado. Así mismo también describe las formas y herramientas para realizar dichos registro. En la Figura 14 se muestra un ejemplo de hoja de registro de medidas goniométricas obtenido de [Taboadela, C. 2007] donde se aprecia la distribución de los datos mencionados anteriormente. En [Norkin, C. C. 2009] se da un apéndice completo de hojas de registro para todas las articulaciones. Además de los datos básicos del registro, también se requiere una descripción del método utilizado para la realización de la prueba, así como del instrumento empleado para ello.

<b>Nombre:</b>			<b>GONIOMETRO TIPO</b>			
<b>Fecha de nacimiento:</b>						
<b>Sexo:</b>						
<b>IZQUIERDA</b>			<b>CADERA</b>	<b>DERECHA</b>		
<b>Fecha</b>	<b>Fecha</b>	<b>Fecha</b>		<b>Fecha</b>	<b>Fecha</b>	<b>Fecha</b>
			Flexión			
			Extensión			
			Abducción			
			Aducción			
			Rotación externa			
			Rotación interna			
<b>Firma</b>	<b>Firma</b>	<b>Firma</b>	<b>EXAMINADOR</b>	<b>Firma</b>	<b>Firma</b>	<b>Firma</b>
<b>Comentarios:</b>						

Figura 14: Hoja de registro para la articulación de la cadera

El desarrollo del prototipo debe contemplar, como mínimo, el registro de los datos aquí descritos, más los que necesite para su funcionamiento interno. En la Tabla 4 se describen los datos que el prototipo almacena para realizar el registro de mediciones.

Concepto	Datos
Lista de articulaciones.	<ul style="list-style-type: none"><li>• Nombre de la articulación</li></ul>
Rangos de medidas aceptadas para los arcos de movimientos.	<ul style="list-style-type: none"><li>• Valores de las medidas</li></ul>
Lista de movimientos	<ul style="list-style-type: none"><li>• Nombre del movimiento</li></ul>
Participantes	<ul style="list-style-type: none"><li>• Nombre o identificador</li><li>• Edad</li><li>• Sexo</li><li>• Peso</li><li>• Altura</li></ul>
Especialistas	<ul style="list-style-type: none"><li>• Nombre</li><li>• Años de experiencia</li></ul>
Posturas	<ul style="list-style-type: none"><li>• Descripción</li></ul>

*Tabla 4: Datos que el prototipo debe registrar*



## Capítulo 4: Diseño del prototipo

La etapa de diseño consiste en especificar en detalle como se implementan todos los componentes del sistema [Satzinger, J. 2010]. En este capítulo se presenta el diseño orientado a objetos del software del que se compone el prototipo, el cual se basa en el método descrito en [Deitel, Paul 2012].

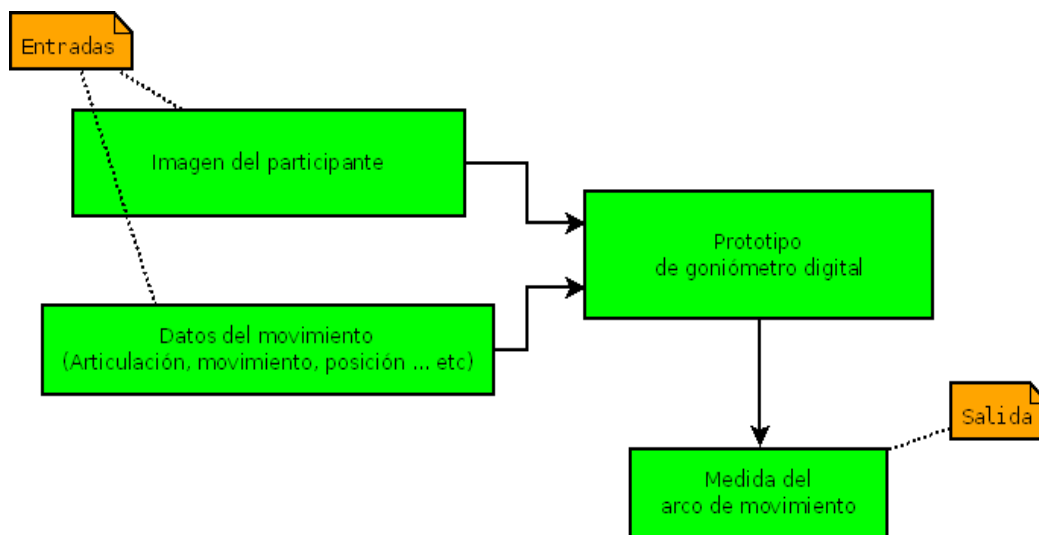


Figura 15: Estructura general del goniómetro digital

El prototipo de goniómetro digital que se desarrolla en esta tesis se puede representar con el diagrama de la Figura 15. En dicha figura, se muestran las principales entradas del sistema, entre las cuales está la imagen que el sistema Kinect captura del participante y la información que se requiere para evaluar el movimiento goniométrico de la articulación. La principal función del prototipo consiste en obtener el arco de movimiento a partir de la información proporcionada. La imagen del participante se muestra directamente en pantalla y a partir de esta, se obtienen los datos del esqueleto del usuario, es decir, en esta tesis no se hace ningún análisis adicional de la imagen.

## 4.1 Articulaciones

Las articulaciones analizadas en esta tesis son cadera, codo y hombro. En la Tabla 5 se muestran los movimientos considerados y en [Norkin, C. C. 2009] y [Taboadela, C. 2007] se detallan los pasos y procedimientos goniométricos a considerar para la obtener el ROM de cada una de ellas.

Articulación	Movimientos
Cadera	Abducción, aducción, rotación interna, rotación externa.
Codo	Flexión, extensión
Hombro	Abducción, aducción, flexión, extensión, rotación interna, rotación externa

Tabla 5: Articulaciones evaluadas y sus movimientos

## 4.2 Identificación de clases

Se inicia el diseño del prototipo a partir de los requerimientos presentados en la sección 3.2, para lo cual se identifican las siguientes clases que componen el sistema:

1. Goniómetro
2. Kinect
3. GUI (Graphical user interface)
4. ROM (Range of Motion)
5. Participante
6. Especialista
7. Movimiento
8. Articulación
9. Lado
10. Postura
11. Conectar con la base de datos
12. Filtro

No existe una clase para el operador del sistema, ya que representa una entidad externa de la que no se requiere información adicional. Por otro lado, para el *Participante* y el *Especialista*, aunque también son externos, es importante registrar y controlar algunos de sus datos para poder analizar la información proporcionada por el prototipo y para la

evaluación de las medidas obtenidas, es por ello que sí se consideran como clases dentro del proyecto. Por otro lado, las clases *Articulacion*, *Postura* y *Lado* se pueden ver como relaciones de composición de la clase *Movimiento*.

La clase *Conectar con la base de datos*, no esta especificada en los requerimientos del sistema, sin embargo, es la encargada de controlar todas las funciones que guarden, modifiquen o consulten datos de las mediciones de los ROMs y se representa mediante una relación de herencia con respecto a *Participante*, *Especialista* y *Movimiento*.

Finalmente, la clase *Filtro*, que tampoco se menciona en los requerimientos, contiene una serie de métodos para mejorar la señal de entrada de los datos obtenidos desde el sistema Kinect.

En la práctica, el proceso de desarrollo de software, es un proceso iterativo en el que cada fase, como el análisis y el diseño, se puede repetir varias veces [Satzinger, J. 2010] y [Deitel, Paul 2012]. En nuestro caso, las clases *Conectar con la base de datos* y *Filtro* se definen una vez hechas algunas pruebas de la funcionalidad del sistema Kinect, las cuales se explican en el capítulo 5 relativo al desarrollo.

Para mayor detalle del proceso de definición de las clases se puede consultar [Deitel, Paul 2012] y [Satzinger, J. 2010] donde se explican a fondo.

### **4.3 Modelado de clases**

El siguiente paso es modelar las clases del prototipo, en base a la lista anterior. Para nombrar las clases se hace referencia a la convención descrita en [Deitel, Paul 2012].

En la Tabla 6 se muestran las clases, junto con su respectivo nombre, que será utilizado en el diseño y desarrollo de la aplicación.

Definición de la clase	Nombre asignado
Goniómetro	Goniometro
Kinect	Kinect
GUI	GUI
ROM	ROM
Participante	Participante
Especialista	Especialista
Movimiento	Movimiento
Articulación	Articulacion
Lado	Lado
Postura	Postura
Conectar con la base de datos	ConectaBD
Filtro	Filtro

Tabla 6: Asignación de nombres a las clases definidas

En la Tabla 6 se puede apreciar que, debido a que la mayoría de las clases se definen con una sola palabra, el nombre asignado es el mismo, a excepción de la clase *Goniometro* y *Articulacion*, donde, para fines del desarrollo del prototipo, se elimina el acento, así mismo, la clase *ConectaBD* también cambia juntando las iniciales de su definición [Deitel, Paul 2012].

### 4.3.1 Identificación de los métodos y atributos

En esta sección se definen los métodos y atributos de cada clase.

En la Figura 16 se representan las clases del prototipo mediante el lenguaje UML. Dada la complejidad y cantidad de atributos y métodos, solamente se presentan los más relevantes. Para más detalles sobre atributos y métodos, consultar [Deitel, Paul 2012].



Figura 16: Resumen de atributos y métodos de las clases definidas

Aunque, por simplicidad no se muestran en la Figura 16, cada clase cuenta con los clásicos métodos públicos `get()` y `set()` para poder obtener y modificar el valor de sus atributos privados, es decir, de sus variables internas.

## 4.4 Diagramas de clases

UML permite modelar las clases de un sistema y la interrelación entre ellas. A continuación se presentan algunos diagramas de clases para el prototipo de goniómetro digital. Para más detalles de UML consultar el anexo A de esta tesis.

### 4.4.1 Relación de composición

El diagrama de composición de la Figura 17 indica que un objeto de la clase *Goniometro* esta formado por un objeto de la clase *Kinect*, un objeto de la clase *GUI*, un objeto de la clase *ROM*, un objeto de la clase *Participante*, un objeto de la clase *Especialista*, y un objeto de la clase *Movimiento*. Como puede apreciarse, no se incluye la clase *ConectaBD* la cual será modelada en la siguiente sección.

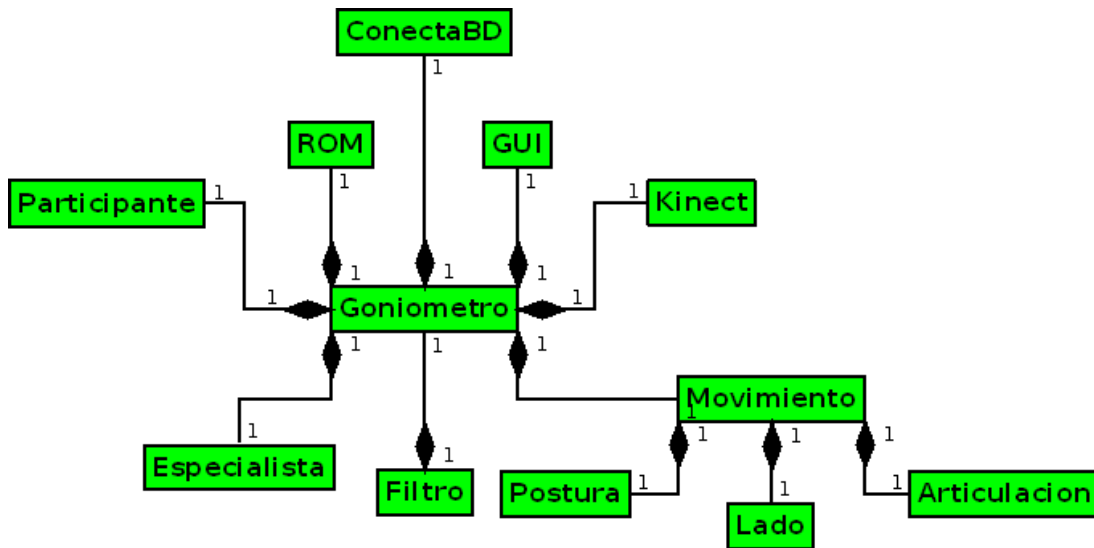


Figura 17: Diagrama de clases mostrando la relación de composición

#### 4.4.2 Relación de herencia

Algunas de las clases definidas no hacen ninguna referencia a la base de datos, es decir, no guardan, no consultan ni modifican datos. Estas clases son: *Goniometro*, *Kinect*, *Filtro*, *GUI* y *ROM*. Por otro lado las clases *Participante*, *Especialista* y *Movimiento* si ejecutan transacciones a la base de datos.

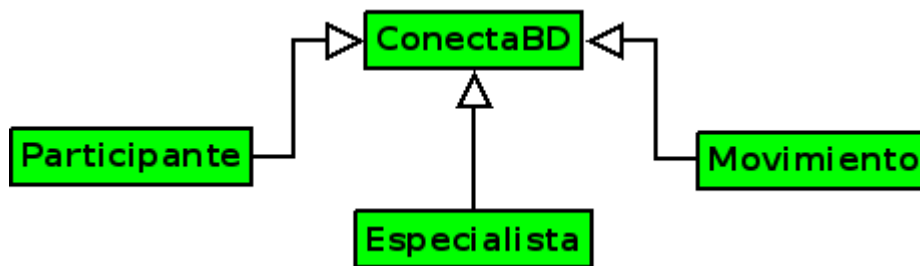


Figura 18: Relación de herencia para el manejo de la base de datos

Se utiliza la clase *ConectaBD* para definir, entre otras, las funciones básicas con la base de datos y de esta clase se heredan, a *Participante*, *Especialista* y *Movimiento*, los métodos y atributos necesarios para su funcionamiento. En el diagrama de clases de la Figura 18 se muestra la relación de herencia comentada.

## 4.5 Diagrama de estados

Estos diagramas muestran los estados de los objetos y bajo que circunstancias pueden cambiar dichos estados, presentan una visión del comportamiento del objeto a través del tiempo y son muy útiles para describir al objeto en un momento dado. Sin embargo, como se indica en [Deitel, Paul 2012] los diseñadores generalmente no crean diagramas de estado para todos los objetos ya que pueden llegar a ser demasiados. Típicamente solo se modelan las partes más importantes del sistema. En esta tesis, se realiza un diagrama de estado para el objeto de la clase *Goniometro*, en él que se muestra los estados que puede adquirir el prototipo, para la toma de una ROM de un participante en un momento dado.

Como lo ilustra el diagrama de la Figura 19, en cualquier punto o estado del proceso, de la toma de medidas del ROM, se puede terminar el programa y salir de la aplicación.

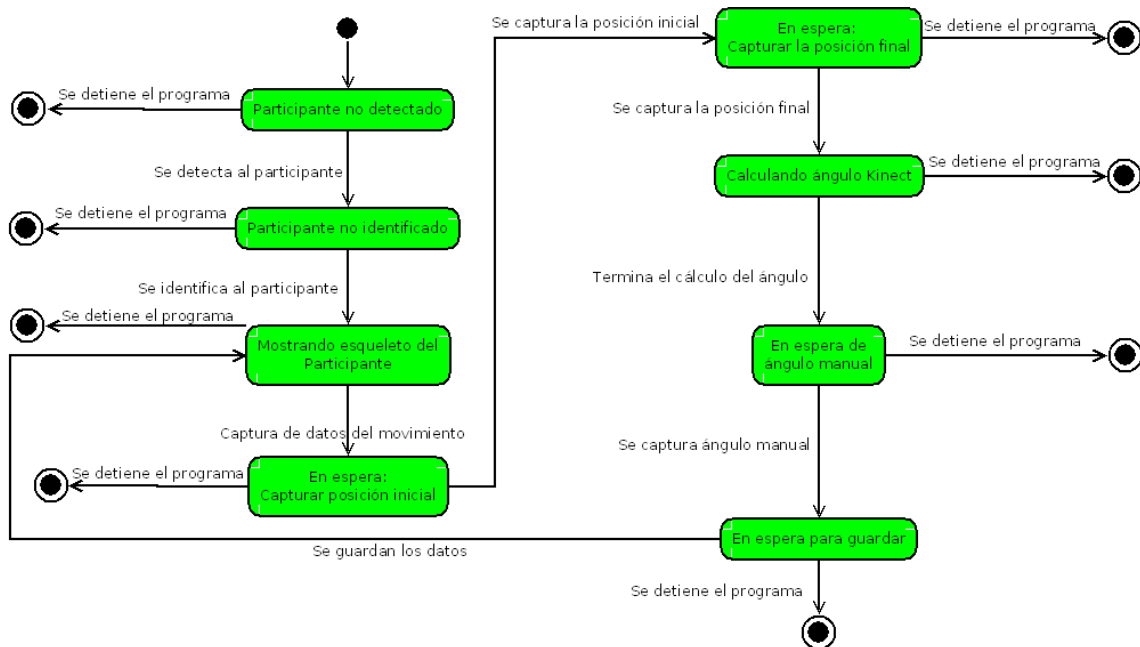


Figura 19: Diagrama de estados para la toma de una medida de un ROM

## 4.6 Diagrama de actividades

Al igual que un diagrama de estado, uno de actividades también modela el comportamiento del sistema. La diferencia es que, un diagrama de actividades modela el flujo de trabajo o secuencia de eventos durante la ejecución del programa, es decir, modela las acciones del objeto y en que orden se realizan. En la Figura 20 se presenta el diagrama de actividades para el prototipo de goniómetro digital.

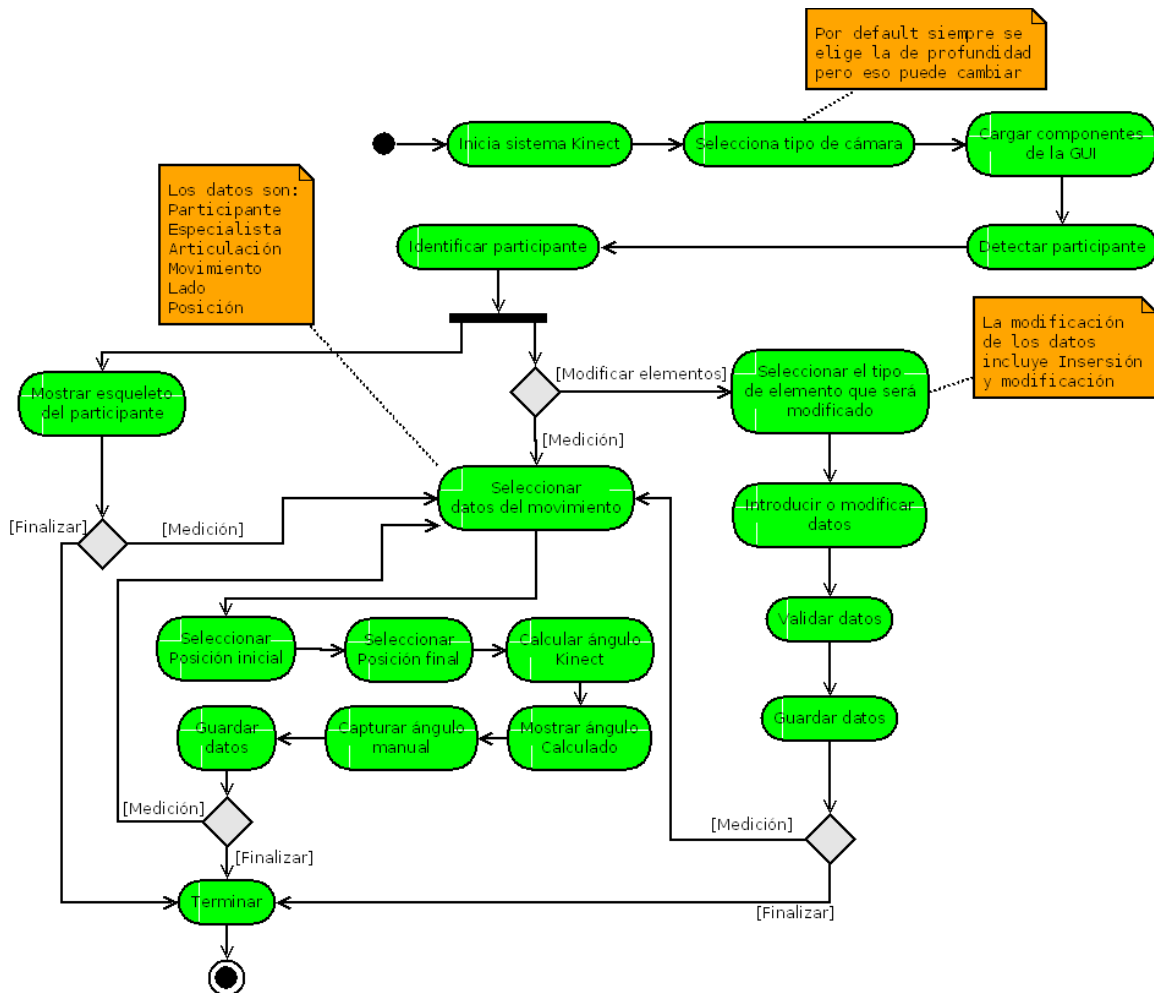


Figura 20: Diagrama de actividades para la medición del ROM

Con objeto de evitar que el diagrama de actividades se vuelva muy confuso y complicado, se han omitido algunos aspectos, lo que permite centrarse en el flujo y la idea principal. El diagrama de la Figura 20 muestra que, después de que ha sido detectado el participante, el prototipo muestra su imagen y permite, al mismo tiempo, ya sea agregar o modificar datos de participantes o comenzar a hacer la captura de los datos



necesarios para medir la ROM de una articulación, además, la Figura ilustra que se puede agregar o modificar datos del participante sin hacer mediciones (se pueden hacer en otro momento) o se puede salir del programa sin medir ni modificar datos.

## 4.7 Diseño de la base de datos

En el diseño de la base de datos se han tomado en cuenta los requerimientos y los objetivos que se quieren alcanzar, distribuyendo las tablas y los datos para que, posteriormente, permitan ejecutar consultas que muestren los datos que se necesitan para dar respuesta a las preguntas planteadas.

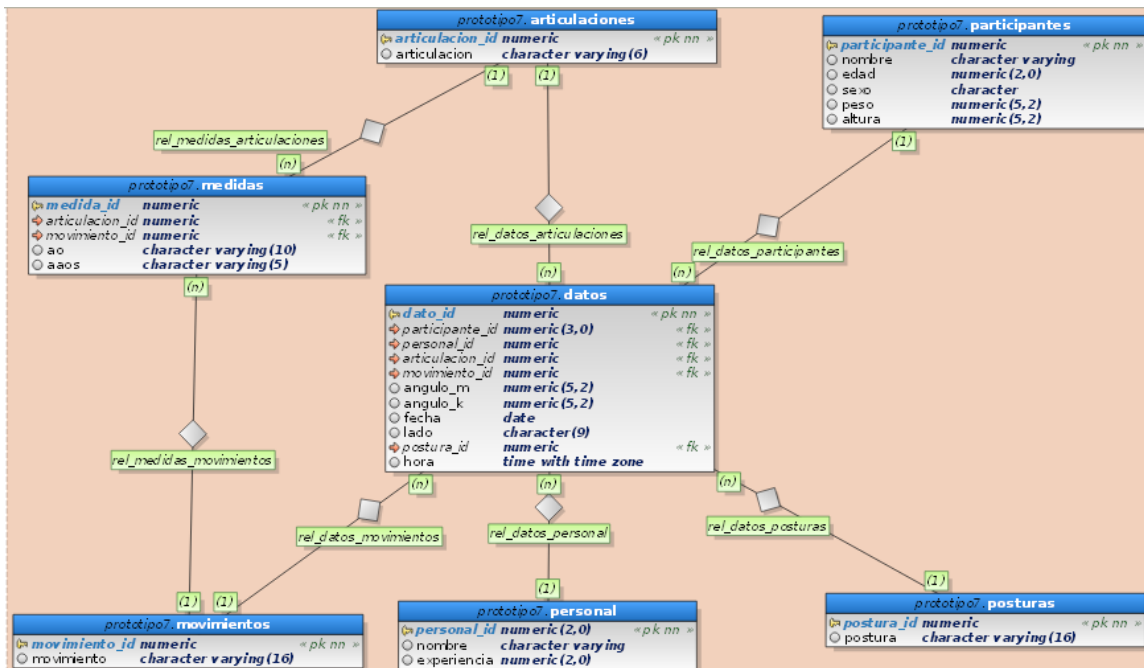


Figura 21: Diagrama ER para la base de datos del prototipo

Tomando como base el análisis de requerimientos de la sección 3.2, el diseño entidad-relación (ER) propuesto para la base de datos se muestra en la Figura 21. Este diseño también permite agregar fácilmente más datos, tales como, posiciones, articulaciones o movimientos.

Las tablas que conforman la base de datos son siete y a continuación se describen brevemente:

1. **Personal**.- Esta tabla contiene la información del personal especialista que

- participa en los experimentos. Solo se guarda el nombre y los años de experiencia que tienen en el campo laboral.
2. **Posturas.**- Guarda información de la posición del participante con respecto al sistema Kinect durante las mediciones, para nuestros experimentos son tres: de frente, de perfil y sentados.
  3. **Movimientos.**- Representa la lista de los movimientos analizados en esta tesis.
  4. **Medidas.**- Son las medidas estándar tomadas de la Asociación para el Estudio de la Osteosíntesis (AO) [AO, 2014] y de la Academia Americana de Cirujanos Ortopédicos (AAOS) [AAOS, 2014]. Sirven de guía durante el desarrollo del prototipo.
  5. **Articulaciones.**- Guarda el nombre de las articulaciones contempladas en la tesis, en este caso son tres: Cadera, Codo, Hombro.
  6. **Participantes.**- Contiene los datos de los participantes tales como nombre, edad, sexo entre otros.
  7. **Datos.**- En esta tablas se guardan los resultados de cada medida hecha durante los experimentos. Es la tabla que conjunta toda la información recabada.

## **Capítulo 5: Implementación del prototipo**

---

En este capítulo se describen los pasos seguidos para la implementación del prototipo de goniómetro digital. Se presentan brevemente las pruebas que se realizan para llegar al prototipo deseado. Algunas de estas pruebas son modificaciones adaptadas de los ejemplos descritos en [Borenstein, G. 2012].

### **5.1 Elección de las herramientas**

#### **5.1.1 Sistema Kinect**

La aparición del sistema Kinect ha resultado de mucho interés para diversas áreas de la investigación tecnológica tales como el reconocimiento facial, análisis de la marcha, esqueletización e imágenes en profundidad, entre otras.

El sistema Kinect cuenta con dos cámaras situadas al centro del dispositivo, una cámara común y una infrarroja, además cuenta con un proyector infrarrojo en uno de los extremos a la izquierda, tal como se muestra de la Figura 22. El proyector infrarrojo emite una luz que no se puede ver a simple vista, además de que, según [Borenstein, G. 2012] es totalmente inofensiva. En la Figura 22 se muestra la estructura del sistema Kinect sin la cubierta exterior.

Adicionalmente, el sistema Kinect cuenta con cuatro micrófonos distribuidos a lo largo del dispositivo, su propósito no solo es el de dotar al sistema Kinect con la capacidad de capturar sonidos, sino localizar la procedencia de los mismos dentro del espacio de trabajo. Por ejemplo, si múltiples jugadores están pronunciando comandos de voz en un juego, el sistema Kinect es capaz de saber qué comando pronuncia cada jugador.



*Figura 22: Sistema Kinect sin cubierta*

Por otro lado, trabajos como los de [LaBelle, K. 2011] y [Padilha, A. 2011] han demostrado que el sistema Kinect tiene buena funcionalidad para ser utilizado como instrumento de rehabilitación física, todo esto sugiere que también puede tener aplicación en Goniometría, tema que aborda esta tesis.

## **5.1.2 Processing**

Processing es un entorno de desarrollo y un lenguaje de programación que esta basado en el popular lenguaje de programación Java y que esta diseñado para escribir de manera fácil y rápida aplicaciones interactivas que utilizan gráficos y otros recursos multimedia [Borenstein, G. 2012].

Como se describe en [Vantomme, J. 2012], el entorno de desarrollo de Processing es conocido por ayudar a artistas, diseñadores, arquitectos y muchos otros a introducirse rápidamente al mundo de la programación, de forma tal que puedan explorar los gráficos y el arte computacional de manera fácil. Creado en 2001 por Ben Fry y Casey Reas se ha convertido en un popular lenguaje de programación con gráficos.

Las características comentadas en los párrafos anteriores hacen de Processing una excelente herramienta para trabajar con la librería OpenNI que se utiliza en muchos proyectos con el sistema Kinect y es la utilizada esta tesis.

### **5.1.3 OpenNI**

La empresa PrimeSence proporciona tanto el framework que contiene el controlador como las librerías para trabajar con el sistema Kinect, estas librerías permiten trabajar con la imagen en profundidad y detectar usuarios, así como localizar la posición de sus articulaciones en tres dimensiones. Llamaron a su software OpenNI por “Natural Interaction”. La información proporcionada por OpenNI incluye la posición y orientación de las articulaciones del usuario. Mientras que otros proyectos como OpenKinect ahora permiten trabajar con estos datos y el SDK de Microsoft los provee para desarrolladores Windows, hasta este momento, OpenNI es la mejor opción para desarrolladores que buscan utilizar la información del usuario (además de la información de profundidad de la escena) [Borenstein, G. 2012] y [LaBelle, K. 2011].

El sistema Kinect, a través de la librería OpenNI, tiene la potencia de analizar la imagen en profundidad generada por la cámara infrarroja y detectar la presencia de un usuario así como algunas articulaciones del mismo [HIG. 2012]. Las principales ventajas de utilizar el sistema Kinect es evitar el análisis de imágenes para obtener las articulaciones del usuario y evitar también, el uso de métodos invasivos para realizar la detección del cuerpo humano. Entre las articulaciones detectadas se encuentran la cabeza, cuello, hombros, codos, manos, torso, cadera, rodillas y pies; como ya se ha comentado anteriormente, es necesario recordar que las articulaciones detectadas no corresponden exactamente a las articulaciones desde el punto de vista anatómico [Borenstein, G. 2012] y [HIG. 2012].

### **5.1.4 PostgreSQL**

PostgreSQL es un sistema de base de datos objeto-relacional de código abierto. Tiene más de 15 años de desarrollo activo y cuenta con una probada arquitectura que le ha dado una fuerte reputación por su fiabilidad e integridad de los datos. Por otro lado cuenta con funciones estadísticas básicas que permiten analizar los datos sin necesidad de utilizar otros programas.

PostgreSQL 9.3 se utiliza para almacenar y organizar los datos recabados durante las pruebas de la validez y confiabilidad de las medidas tomadas con el sistema Kinect [PSQL, 2014].

## 5.2 Notas sobre la instalación

No es el propósito de esta sección mostrar un proceso paso a paso de como se hace la instalación, ya que hay bastante información bien documentada al respecto [OpenNI, 2014], [Brekel, 2014], más bien el objetivo es especificar los parámetros utilizados tales como las herramientas y sus respectivas versiones con el fin de mostrar un panorama general de como se realizan los experimentos.

Para el desarrollo de esta tesis se utiliza el proceso de instalación descrito en [Borenstein, G. 2012] y en [Simple-Openni, 2014] ya que cuentan con información detallada para realizar dicha tarea en los sistemas operativos Windows, OSX y Linux. Además de que proporcionan los enlaces necesarios para la de descarga del software requerido.

Para este prototipo se probó la instalación en Windows 7 y Linux (Debian 7 y Fedora 18) y en ambas plataformas funcionó correctamente siguiendo el proceso previamente comentado, sin embargo, pese a que en [Bockstege, B. 2011] se muestra que en Linux se tiene un mejor rendimiento, se elige Windows 7 para el desarrollo y la realización de las pruebas, por estar este más difundido y a simple vista, no presentar diferencias significativas en el rendimiento que perciben los usuarios.

Las versiones utilizadas durante la implementación del prototipo de goniómetro digital se muestran en la Tabla 7.

Herramienta	Nombre	Versión
Librería para Kinect	OpenNI	1.5.4.0
Controlador	PrimeSense - Nite	1.5.2.1
Lenguaje de programación	Processing	2.1
Entorno de desarrollo	Processing	2.1
Lenguaje de programación <sup>9</sup>	Java	7 (1.7.0_51-13)
Sistema Operativo	Windows	7
Base de datos	PostgreSQL	9.3.1

Tabla 7: Versiones de herramientas utilizadas

<sup>9</sup> Como se ha mencionado anteriormente, Processing se basa en Java y es importante tomar en cuenta la versión de este último para evitar problemas de compatibilidad.

## 5.3 Pruebas iniciales

En esta sección se describen las pruebas realizadas para llegar al prototipo final del goniómetro digital.

### 5.3.1 Prueba 1: Obtener imagen

Esta es la prueba inicial y permite verificar el funcionamiento del sistema Kinect. En ella se obtienen imágenes de ambas cámaras la convencional y la de profundidad. Con una variable de tipo booleano se puede controlar qué cámara está activa en un momento dado, tal como se muestra en el Código 1.

```
Boolean profundidad = false;
context = new SimpleOpenNI(this);
if (profundidad){
    image(context.depthImage(),0,0);
} else {
    image(context.rgbImage(),0,0);
}
```

*Código 1: Seleccionar cámara en profundidad o convencional*

La clase *SimpleOpenNI* cuenta con todas las funciones que se necesitan para controlar las características del sistema Kinect y adquirir los datos de los participantes detectados, tal como se describe en las siguientes secciones. En este código de ejemplo se utiliza el método *depthImage()* para obtener la imagen en profundidad y *rgbImage()* para la imagen convencional. En la Figura 23 se muestran las imágenes obtenidas de ambas cámaras, la de profundidad (lado izquierdo) y la convencional (lado derecho).



Figura 23: Cámara en profundidad (izquierda) y cámara convencional (derecha) [Borenstein, G. 2012].

### 5.3.2 Prueba 2: Obtención del esqueleto

En esta prueba se realiza la obtención de los datos del esqueleto del usuario que posa frente a la cámara, para que esto sea posible, es necesario que se realicen los procedimientos correspondientes para detectar e identificar al usuario. El primer paso es indicarle a OpenNI que se requiere habilitar el seguimiento de usuario. Esto se realiza con la función *enable.User()* como se muestra en el Código 2. En el que se pasa como parámetro la constante *SimpleOpenNI.SKEL\_PROFILE\_ALL* con la que se indica a OpenNI que se quiere trabajar con todas las articulaciones que puede proporcionar la librería.

Posteriormente, con la función *getUser()*, se obtiene un identificador que se guarda en un arreglo de usuarios, aunque para esta tesis solo se utiliza uno, OpenNI es capaz de identificar y trabajar con varios simultáneamente.

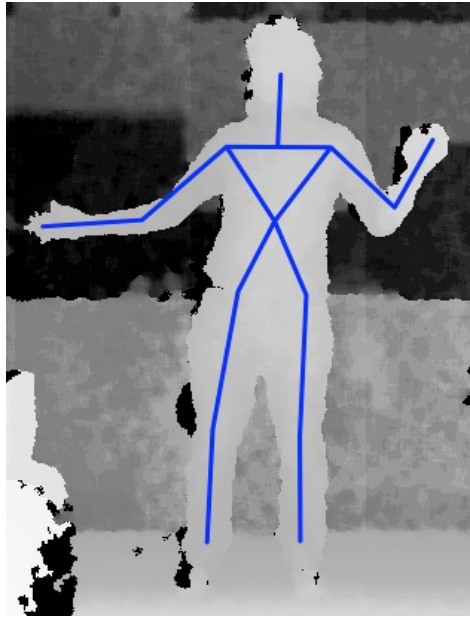
```
context.enableUser(SimpleOpenNI.SKEL_PROFILE_ALL);  
  
...  
  
int[] userList = context.getUsers();  
for(int i=0;i<userList.length;i++) {  
    if(context.isTrackingSkeleton(userList[i])){  
        drawSkeleton(userList[i],p_body);  
        altura_paciente = getAltura(userList[i]);  
    }  
}
```

*Código 2: Código para detectar usuario y comenzar a mostrarlo en pantalla*

Si la función *isTrackingSkeleton(usuario\_id)* del Código 2 retorna un valor verdadero, indica que el usuario se ha detectado y se ha identificado adecuadamente, con lo que se puede comenzar a mostrar su esqueleto en pantalla.

En la Figura 24 se muestra un ejemplo del esqueleto de un usuario detectado por el sistema Kinect.





*Figura 24: Esqueleto identificado mediante OpenNI y el sistema Kinect [Borenstein, G. 2012]*

### **5.3.3 Prueba 3: Seguir la articulación de la mano**

Esta prueba se centra en una articulación de la mano y permite comenzar a analizar los datos obtenidos con el sistema Kinect.



*Figura 25: Seguimiento de la articulación de la mano [Borenstein, G. 2012]*

La Figura 25 muestra una imagen de la prueba. Esta prueba hace la introducción al concepto de proyección desde un mundo 3D, que es el que se obtiene con la cámara en profundidad, a un mundo en 2D, en el que se muestra el punto correspondiente a la articulación, sobre la pantalla.

Como se indica en [Borenstein, G. 2012], lo primero que hay que hacer es obtener la posición de la mano desde la librería OpenNI. Esta da la posición de la mano en coordenadas del mundo real, tomando como origen la base del sistema Kinect, sin embargo la posición de la mano es representada en 2D en la pantalla de la computadora, para lograr esto, se requiere una traslación del mundo 3D al 2D, afortunadamente OpenNI cuenta con una función que ayuda en este aspecto. Una vez hecha la transformación es posible representar el punto correspondiente a la mano en base al sistema de coordenadas en 2D que se obtuvo.

```
PVector rightHand = new PVector();
context.getJointPositionSkeleton(userId,
    SimpleOpenNI.SKEL_RIGHT_HAND, rightHand);
PVector convertedRightHand = new PVector();
context.convertRealWorldToProjective(rightHand,
    convertedRightHand);
```

*Código 3: Obtención y proyección de la posición de la mano derecha*

Como se puede observar en el Código 3, la función *getJointPositionSkeleton()* recibe tres argumentos, el identificador de usuario, una constante que indica la articulación con la que se va a trabajar y un vector en donde se guardan las coordenadas de la posición de la articulación en 3D.

Posteriormente, se toma el vector de posiciones y se pasa como argumento a la función *convertRealWorldToProjective()* la cual regresa un vector con la posición de la articulación proyectada a 2D y que corresponde con la tomada por la cámara en profundidad. La Figura 26 muestra la relación entre el mundo de tres dimensiones y la proyección obtenida.

Hay que resaltar que OpenNI considera la orientación de las articulaciones desde el punto de vista de la pantalla, es decir, la mano derecha del usuario es mostrada en el lado izquierdo de la pantalla y viceversa.

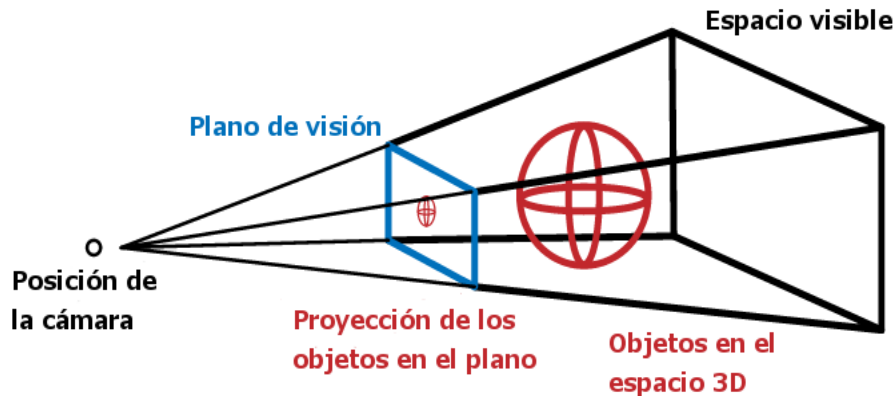


Figura 26: Relación entre el mundo de tres dimensiones y la imagen proyectada

### 5.3.4 Prueba 4: Análisis de los datos de la mano

Uno de los objetivos de esta tesis es determinar la precisión de las medidas tomadas mediante el sistema Kinect. Esta prueba es de particular importancia pues permite verificar la estabilidad de los datos del sistema Kinect obtenidos mediante la librería OpenNI. Para realizar este paso, se retoma la prueba 5.3.3 con algunas modificaciones, para guardar los datos necesarios. Una vez que se ha realizado correctamente la prueba anterior, se modifica para que las coordenadas de la articulación de la mano se guarden en un archivo y este pueda ser analizado posteriormente. Para realizar la captura de los datos se utiliza la clase mostrada en la Figura 27.

```

Archivo
- nom_archi: String
- pw: PrintWriter
+ Archivo(nombre:String)
+ escribe(datos:String)

```

Figura 27: Clase Archivo para guardar los datos de la articulación

Processing cuenta con la función *draw()* que se utiliza para refrescar las interfaces de usuario cada determinado tiempo, ya que el sistema Kinect captura una imagen a una velocidad máxima de 30 FPS [Borenstein, G. 2012], se obtienen las coordenadas de la articulación de la mano cada que se obtiene una nueva imagen, se guardan los valores y posteriormente, se analizan para ver la estabilidad de las muestras. El usuario debe permanecer inmóvil durante la realización de la prueba. Los resultados de esta prueba

presentan variación entre las muestras tomadas, esta variación conocida como ruido afecta los resultados de los ROMs a la hora de implementar el prototipo de goniómetro. Por tal motivo, se hace uso de un filtro digital pasa bajas de tipo FIR (Finite Impulse Response, por sus siglas en inglés), con una frecuencia de corte de 8 Hz y una frecuencia de muestreo de 25 Hz. Este filtro permite atenuar el ruido y mejorar la calidad de las muestras. En la Figura 28 se pueden ver los resultados de ambas pruebas, en azul para la medición sin aplicar el filtro y en rojo aplicando el filtro.

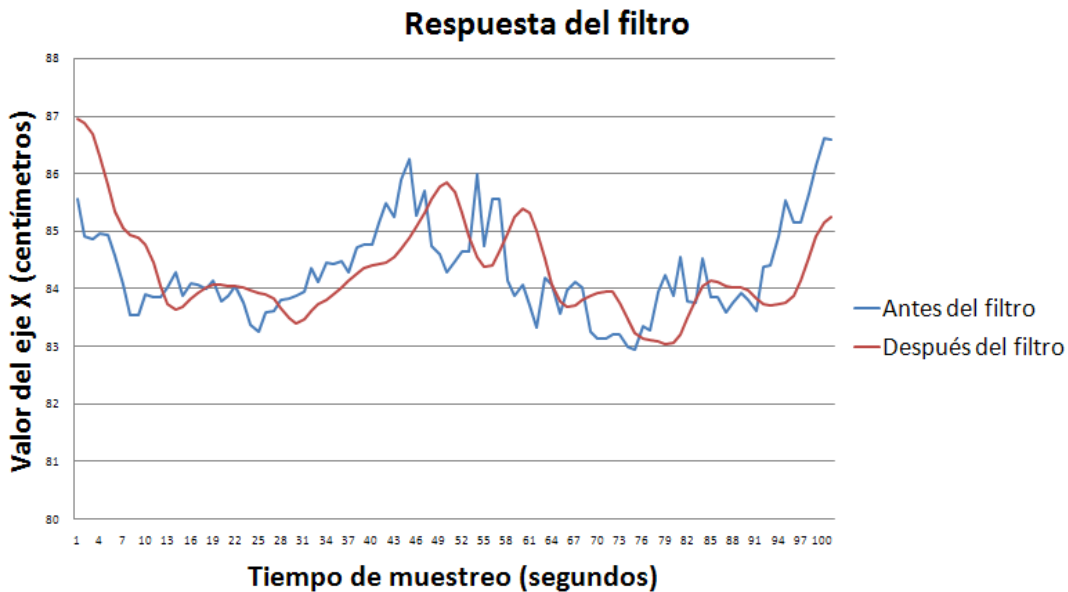


Figura 28: Gráficas de comparación antes y después de aplicar el filtro

En la Figura 28 se muestra que, con ayuda del filtro implementado es posible mejorar la estabilidad de los datos obtenidos desde el sistema Kinect y así, posteriormente, obtener mejores mediciones de los ángulos de los arcos de movimiento para el prototipo de goniómetro digital. Como se puede apreciar en la Figura 28, la aplicación del filtro provoca un retraso en la señal por un tiempo  $t$  que, si fuera demasiado grande, también retrasaría el seguimiento del esqueleto del sujeto en la pantalla, sin embargo, con los valores utilizados, este retraso no resulta significativo, puesto que, aún con la aplicación del filtro, el usuario no nota la diferencia.

Dada su importancia y puesto que no estaba previsto su desarrollo, a continuación se describe el diseño del filtro pasa bajas utilizado.

## 5.3.4.1 Diseño del filtro

El filtro digital diseñado se puede representar mediante una serie de sumas. A continuación se muestra de forma gráfica el modelo del filtro generado en Simulink-Matlab [Matlab, 2014].

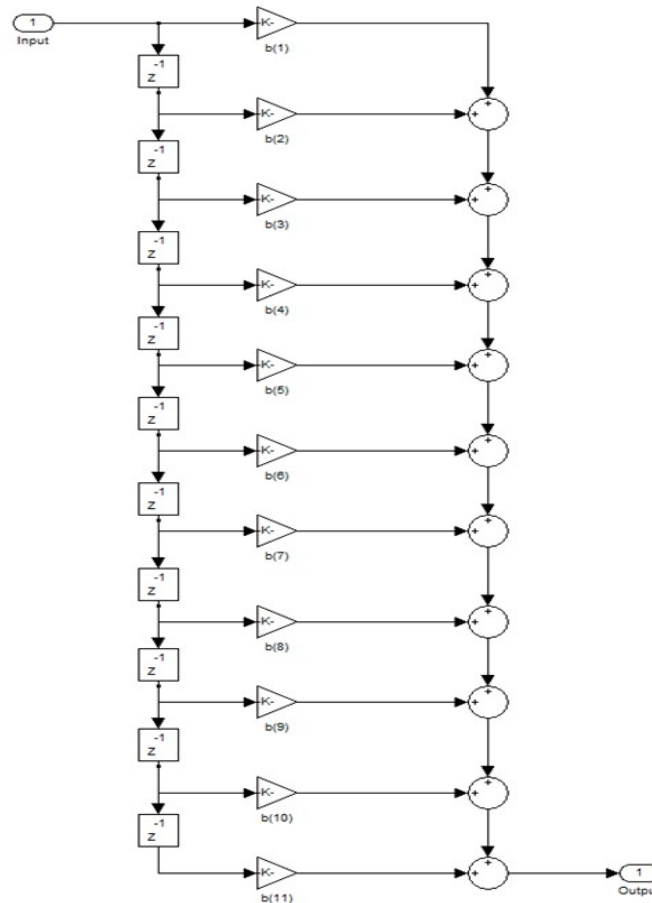


Figura 29: Modelo generado por simulink

En la Figura 29 se muestra la representación hecha con la herramienta simulink de Matlab. En esta Figura se nota que el filtro se puede representar con una serie de sumas de sus valores presentes y pasados, es por eso que en la señal de salida se aprecia un ligero retraso con respecto a la señal de entrada. Este modelo también se puede representar con la siguiente ecuación:

$$y[n] = a_0 \cdot x[n] + a_1 \cdot x[n-1] + a_2 \cdot x[n-2] + \dots + a_N \cdot x[n-N] \quad (1)$$

Para más detalles teóricos de los filtros de señales ver el anexo B.

En la Figura 30 se muestran los datos del diseño utilizando la herramienta *fdatool* de Matlab.

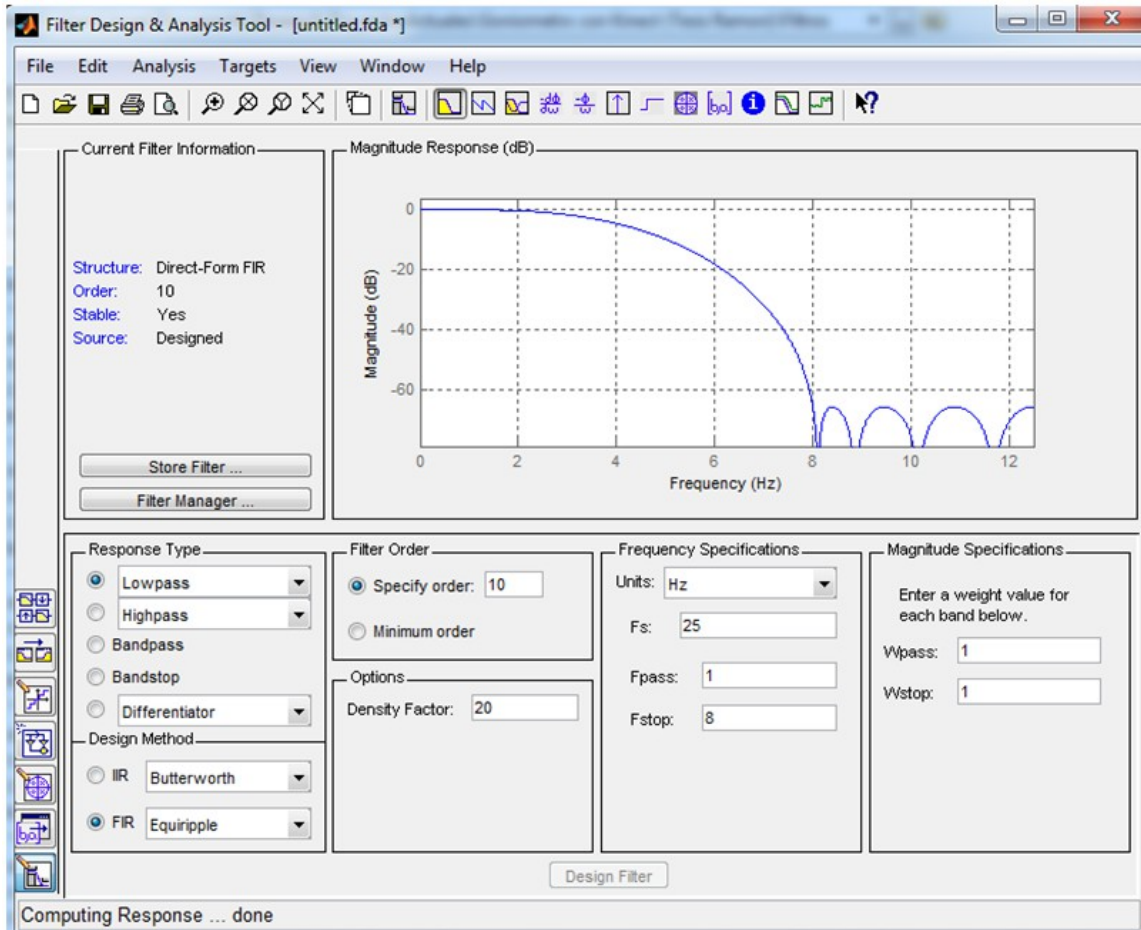


Figura 30: Diseño del filtro con *fdatool*

Como se puede apreciar en la Figura 30 los datos utilizados para simular el filtro son los siguientes:

- La frecuencia de muestreo: 25 Hz
- El orden del filtro: 10
- Frecuencia de corte: 8Hz

También se utilizó Simulink para hacer una representación en bloques del filtro digital diseñado.

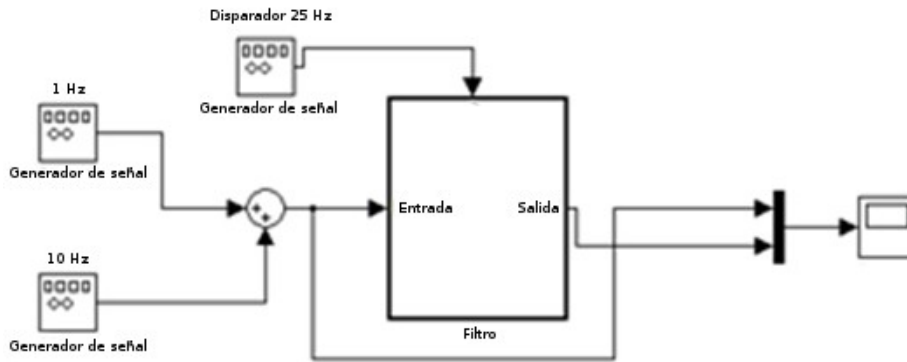


Figura 31: Modelo empleado para el filtro

El modelo de simulación en Simulink mostrado en la Figura 31 tiene como entrada dos señales senoidales a distintas frecuencias con una amplitud de 1V. La primera señal es de baja frecuencia (1 hz) y simula los movimientos de una de las articulaciones medidas por el sistema Kinect, en este caso el movimiento de la mano. La segunda señal, es de alta frecuencia (10 hz) y simula el ruido en la señal del sistema Kinect. Ambas señales se suman y son la entrada del subsistema. Dicho subsistema contiene el modelo del filtro digital, el cual se dispara con una frecuencia de 25Hz para simular la frecuencia de muestreo del Kinect. La salida del subsistema es la señal filtrada. Como es un filtro pasa bajas, se espera eliminar la señal de alta frecuencia y quedarse solo la de baja frecuencia, recordar que la frecuencia de corte del filtro es 8 Hz. El resultado de la simulación se muestra en la Figura 32.

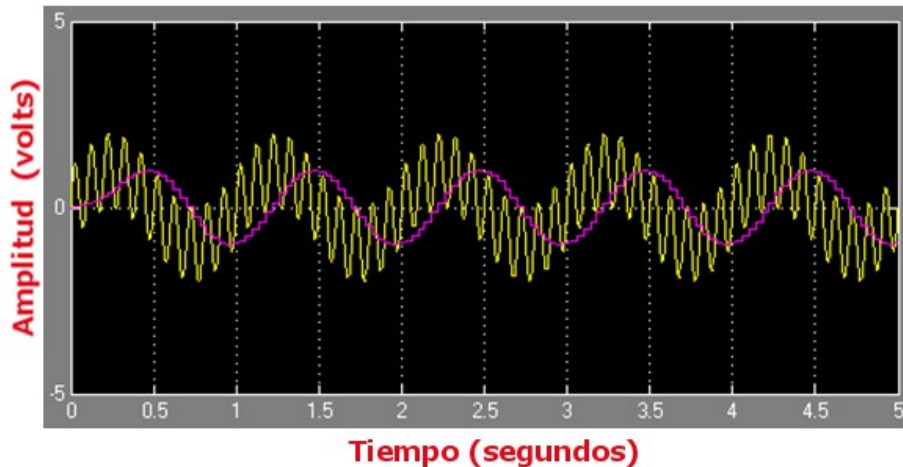


Figura 32: Resultado de la simulación del filtro con Matlab

En la Figura 32 se muestra, en color amarillo la señal de entrada del filtro que es la suma de las dos señales de entrada. La señal magenta es la salida y representa la señal filtrada, se puede apreciar que se elimina la señal de alta frecuencia.

La Tabla 8 muestra los coeficientes obtenidos a partir de la simulación, estos valores fueron utilizados en la programación del filtro para utilizarlo dentro del prototipo de goniómetro digital.

$a_n$	Valor
0	-0.009098458232532
1	-0.02666373200637
2	-0.008109964355278
3	0.1021676701978
4	0.2670307164332
5	0.3491573181978
6	0.2670307164332
7	0.1021676701978
8	-0.008109964355278
9	-0.02666373200637
10	-0.009098458232532

*Tabla 8: Coeficientes calculados para el filtro pasa bajas*

Finalmente, es necesario comentar que, además de la clase para guardar los datos en archivos, para esta prueba también se utilizan dos clases más, una que implementa el filtro y otra que permite llevar un hilo de ejecución en paralelo para que las tomas de las muestras no sean afectadas por el flujo normal de la ejecución del programa. En la Figura 33 se muestran ambas clases.



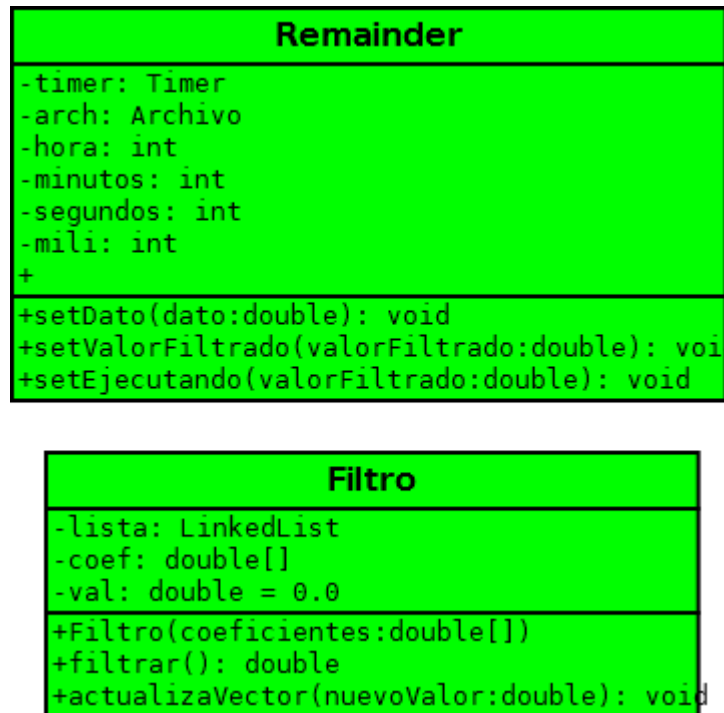


Figura 33: Clases para utilizar el filtro diseñado

### 5.3.5 Prueba 5: Distancia entre dos articulaciones

Ahora que se obtiene una mejor estabilidad en los datos, es posible empezar a realizar operaciones con los valores de las coordenadas de cada articulación. Una de estas pruebas es la obtención de la distancia entre dos articulaciones de las detectadas por el sistema Kinect y presentadas en [Borenstein, G. 2012]. Como ya se ha mencionado anteriormente, el sistema Kinect proporciona los datos en coordenadas en el espacio, es decir, en 3D. Entonces, para representar un punto se utilizan tres coordenadas  $x$ ,  $y$  y  $z$ . En esta prueba se inicia con el uso de la teoría de vectores para trabajar con la información de las articulaciones de los participantes captados por el sistema Kinect.

Para este ejemplo, se utiliza la teoría de la distancia entre dos puntos en el espacio, que se basa en la simple sustracción de vectores. Específicamente se obtiene la distancia entre las dos manos del participante.

Processing cuenta con la implementación de un tipo de dato denominado PVector [Processing, 2014] el cual contiene varias operaciones que son de particular importancia para el desarrollo de esta tesis. En este caso, se utiliza la función `dist()` que recibe como parámetros dos vectores para obtener la distancia entre los dos puntos que representan<sup>10</sup> la

<sup>10</sup> Processing también cuenta con la función `sub()` y `mag()` para la sustracción de vectores y para obtener

posición en el espacio de las articulaciones de las manos del participante. En el Código 3, mencionado anteriormente, se muestra que los valores de las coordenadas de una articulación del esqueleto del participante, se guarda en una variable de tipo PVector de esta forma lo único que se tiene que hacer es obtener los vectores para la articulación de cada mano y utilizar la función *dist()* para calcular la distancia entre las manos del participante, tal como se muestra en el Código 4.

```
PVector leftHand;  
PVector rightHand;  
kinect.getJointPositionSkeleton(userId,SimpleOpenNI.SKEL_LEFT_HAND,  
    leftHand);  
kinect.getJointPositionSkeleton(userId,SimpleOpenNI.SKEL_RIGHT_HAND,  
    rightHand);  
float distancia = PVector.dist(leftHand,rightHand);
```

*Código 4: Calcular la distancia entre articulaciones*

Esta prueba se basa en un ejercicio publicado en [Borenstein, G. 2012], sin embargo, se han realizado algunas modificaciones tales como la forma de calcular la distancia entre las articulaciones de las manos del sujeto medido, también se ha modificado la interfaz de usuario que permite emplear la librería G4P para la creación de una interfaz gráfica de usuario (GUI, por sus siglas en inglés) en ambiente Processing, para más información sobre la librería ver [G4P, 2014]. En la Figura 34 se muestra la interfaz modificada para esta prueba.

---

la magnitud de un vector, respectivamente. Estas funciones se podrían utilizar para obtener la distancia entre dos puntos pero es más claro y práctico utilizar *dist()* que lo hace en un solo paso.

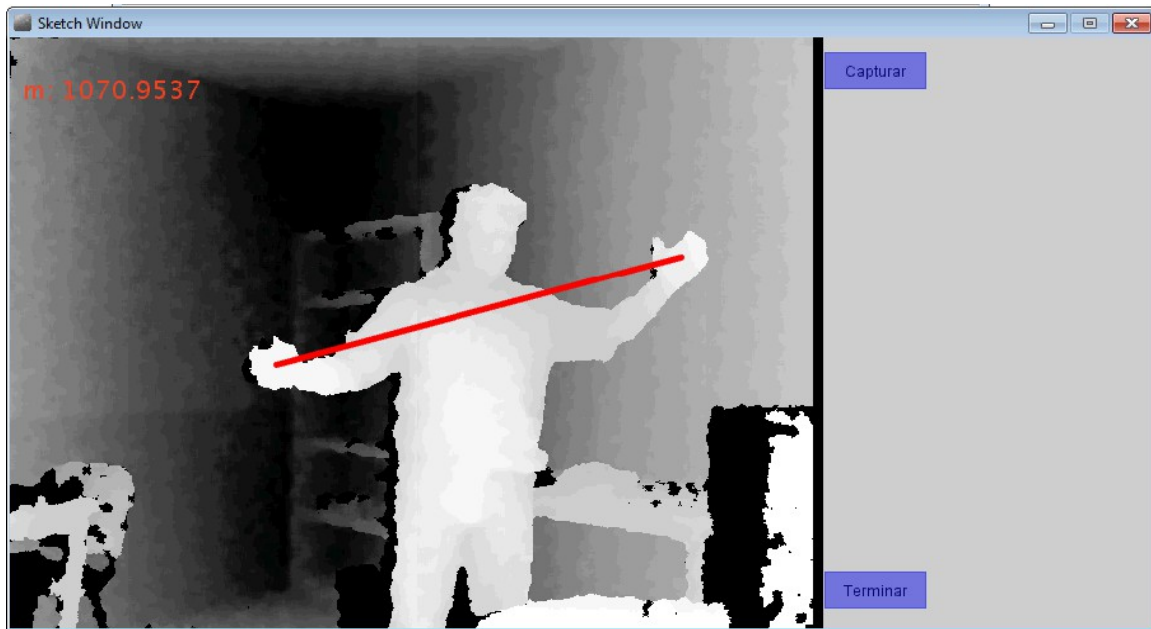


Figura 34: Calculando la distancia entre articulaciones

### 5.3.6 Prueba 6: Ángulo entre dos articulaciones

Processing cuenta con funciones para calcular el ángulo entre dos puntos que representan articulaciones adyacentes. La Figura 35 muestra como se hace el cálculo del ángulo entre articulaciones, en esta figura, también se pueden identificar las articulaciones (puntos en color rojo) que la librería OpenNI proporciona.

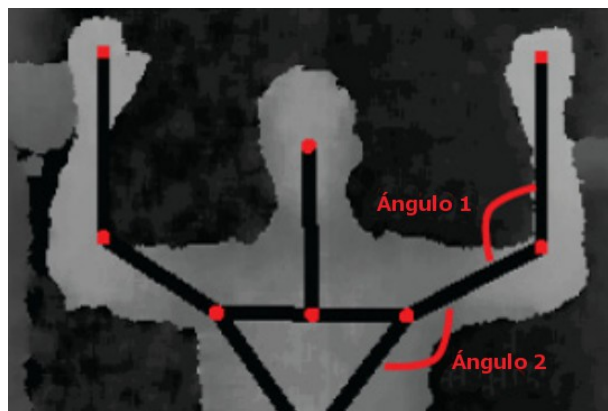


Figura 35: Ángulo entre articulaciones adyacentes

El ángulo medido se hace sobre la intersección de los ejes longitudinales a nivel de la articulación que se desea medir, por ejemplo, para una articulación del codo, como se muestra en la Figura 35, se toman los ejes que unen la articulación del codo a la articulación del hombro y la de la mano para formar dos rectas que se interceptan en la articulación deseada. También en la Figura 35, se pueden apreciar pequeñas variaciones entre los puntos que el sistema Kinect detecta para las articulaciones, por ejemplo, el punto que representa al hombro derecho no es exactamente el correspondiente punto que representa al hombro izquierdo, esto puede provocar diferencias en las mediciones lo que es evaluado en la etapa de experimentación descrita en el capítulo 6.

El Código 5 muestra los pasos a seguir para calcular el ángulo deseado, desde la adquisición de las coordenadas de cada articulación hasta el cálculo del ángulo. Como puede verse, el resultado se obtiene en radianes mediante la función *angleBetween()* que recibe dos vectores como parámetro. Para obtener el ángulo en grados se utiliza la función *degrees()* que recibe como parámetro el valor del ángulo en radianes y regresa el ángulo en grados.

```
double angulo;
PVector pointOne;
PVector pointTwo;

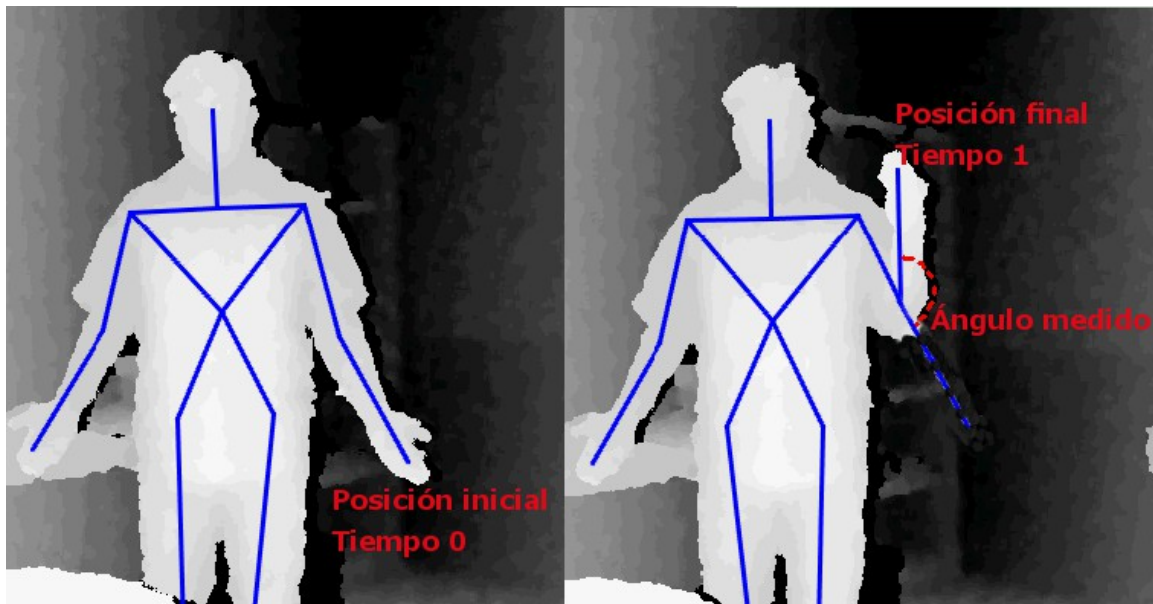
kinect.getJointPositionSkeleton(userId,
    SimpleOpenNI.SKEL_RIGHT_ELBOW,pointOne);
kinect.getJointPositionSkeleton(userId,
    SimpleOpenNI.SKEL_RIGHT_HAND,pointTwo);
angulo = degrees(PVector.angleBetween(vecOne, vecTwo));
```

*Código 5: Calcular el ángulo entre dos articulaciones*

## 5.4 Proceso para calcular el ROM de una articulación

Ahora que se ha explicado como se calcula el ángulo entre dos articulaciones utilizando Processing y OpenNI, se puede proceder a hacer cálculos de los ROMs de las articulaciones seleccionadas para esta tesis.

Como se menciona en la sección 2.1 donde se habla del procedimiento para calcular una ROM desde el punto de vista de la goniometría, se requiere de dos posiciones denominadas inicial y final, por lo tanto no se busca el ángulo entre dos articulaciones en un tiempo determinado tal como se mostró en la prueba 6, lo que se busca es capturar una articulación en un tiempo  $t_0$  y posteriormente, la misma articulación en un tiempo  $t_1$  para que a partir la posición de dicha articulación se haga la medición del ROM deseado. En la Figura 36 se muestra este aspecto de la medición.



*Figura 36: Posiciones inicial y final para el cálculo del ROM de una articulación*

Por lo tanto, se requiere captar y guardar la información de la articulación cuando el participante se encuentra en la posición inicial, posteriormente, se requiere capturar y guardar la información de la articulación cuando el participante se encuentra en la posición final y por último calcular el ángulo entre la posición inicial y la posición final. En la Figura 37 se muestra un extracto del diagrama de actividades mostrado en la Figura 20 donde se muestra este proceso.

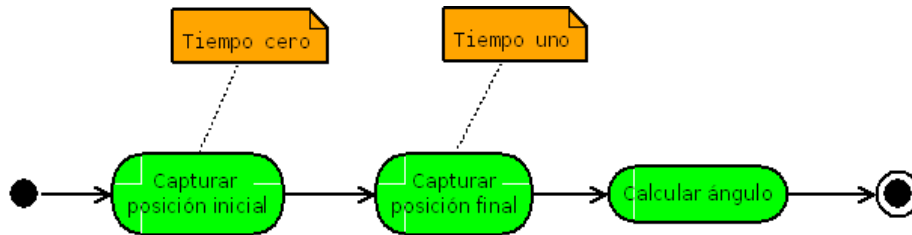


Figura 37: Proceso general para calcular el ROM de una articulación

### 5.4.1 Diseño de la interfaz

El diseño de la interfaz del usuario se hace con el objetivo de realizar los experimentos necesarios para la evaluación de la validez y confiabilidad de las medidas tomadas con el prototipo. No es una interfaz que vaya a ser utilizada por los especialistas en la práctica clínica, sin embargo, sí cumple con los requerimientos definidos en el análisis del sistema.

La Figura 38 muestra la interfaz de usuario final del software desarrollado.

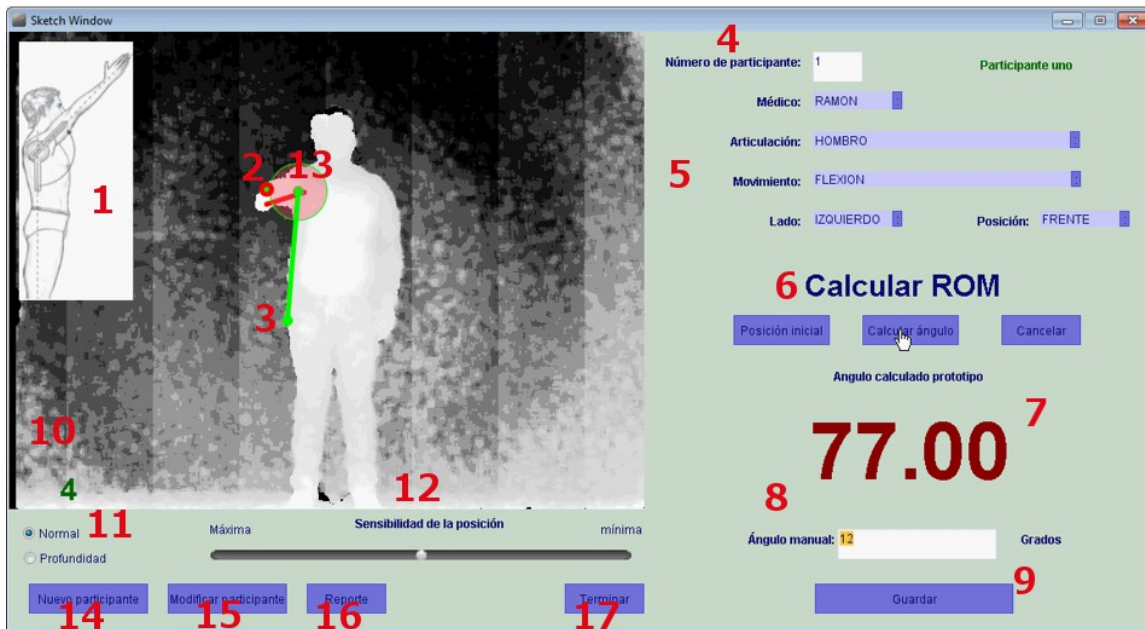


Figura 38: Interfaz final del prototipo de goniómetro digital

A continuación, se describe el funcionamiento de cada uno de los elementos de la interfaz de usuario, los cuales han sido numerados en color rojo en la Figura 38.

1. Guía visual para el operador del sistema, especialista y participante. Según la

- articulación y el movimiento que se desea evaluar, en esta parte aparece una imagen del movimiento en posición inicial. Cuando se haya capturado la posición inicial, la imagen que se muestra es la de la posición final.
2. Guía punto rojo. Sirve para que el participante pueda hacer mejor el movimiento en caso de que se hagan varias repeticiones. Cuando se realiza la captura de la posición final, aparecerá este punto en pantalla para indicarle al participante donde debe colocar la articulación, esto permite obtener exactamente el mismo rango de movimiento que la repetición inicial.
  3. Guía línea de color verde. Se muestra cuando la posición inicial ha sido capturada para indicar al participante donde debe colocar la articulación para iniciar la siguiente repetición.
  4. Cuadro para elegir participante. Con esta opción, se elige al participante, cuando los datos de este ya han sido capturados
  5. Sección datos del movimiento. Son varias opciones que corresponden con los datos del movimiento a evaluar, se selecciona el especialista que hace la validación de las posiciones inicial y final, la articulación, el movimiento, el lado y la posición.
  6. Botón posición inicial y final. Con estos tres botones se captura la posición inicial, y al hacer click en calcular ángulo automáticamente se captura la posición final y se calcula el ángulo medido por el prototipo. El botón cancelar reinicia los valores de los puntos 4 y 5 anteriores para ingresarlos nuevamente.
  7. Ángulo digital. Aquí se muestra el ángulo medido mediante el sistema Kinect.
  8. Ángulo manual. Aquí se captura el ángulo que el especialista le dicta al operador del sistema y que es medido con el goniómetro universal y mediante el método tradicional.
  9. Botón guardar. El proceso de calcular el ángulo cuando el participante ha hecho el movimiento se puede repetir en varias veces. Cuando se ha llegado al número de repeticiones deseadas se pueden guardar todos los datos haciendo click en guardar.
  10. Contador. Es un contador de repeticiones, se reinicia cuando se guardan los datos, cuando se cancela la toma de la medida, cuando el participante hace un movimiento no valido o cuando el sistema Kinect “pierde” al participante.
  11. Seleccionar cámara. Permite mostrar la cámara tradicional o la cámara en profundidad, aunque para todos los experimentos de esta tesis se conserva por default la cámara en profundidad.
  12. Sensibilidad de la posición. Una vez que el participante a adoptado la posición inicial, debe mantenerla hasta la posición final. Si se mueve más allá del rango permitido, el sistema indicara que la posición no es válida y se debe reiniciar el proceso de medición. Si se hacen varias repeticiones, el participante debe permanecer en la posición válida durante todas ellas moviendo únicamente la articulación en evaluación, si se sale del rango todas las anteriores repeticiones quedan invalidas.

### *Proceso para calcular el ROM de una articulación*

---

13. Guía de sensibilidad. Este círculo semi-transparente indica el rango permitido que el participante debe mantener para la articulación que sirve como base para el cálculo del ROM.
14. Botón nuevo participante. Con este botón se abre una ventana para ingresar un nuevo participante.
15. Botón modificar participante. Con este botón se abre una ventana para modificar los datos de los participantes.
16. Botón reporte. Con este botón se muestra el historial de medidas hechas a un participante (solo para fines ilustrativos).



## **Capítulo 6: Experimentos**

---

En este capítulo se describen los experimentos realizados para la evaluación del prototipo de goniómetro desarrollado en esta tesis, los cuales están orientados a dar respuesta a la hipótesis planteada en la sección 1.3 de este documento, en base a lo cual se definen los siguientes términos:

1. **Validez.-** Se refiere a qué tan bien una medida representa el valor real de la variable de interés [Norkin, C. C. 2009]. Para este prototipo se presenta la comparación entre el dato obtenido mediante el prototipo de goniómetro digital desarrollado y el dato obtenido con el goniómetro universal, el cual utiliza el método tradicional, considerando a este último como valor real.
2. **Confiabilidad.-** Una medida goniométrica es confiable si sucesivas mediciones del ángulo de una articulación en el mismo sujeto y bajo las mismas condiciones brindan el mismo resultado [Norkin, C. C. 2009]. Para este prototipo se mide varias veces la misma articulación del mismo sujeto o participante bajo las mismas condiciones.

El índice estadístico elegido para evaluar tanto la confiabilidad como la validez es el Coeficiente de Correlación Intraclase (ICC, por sus siglas en inglés) el cual se ha utilizado en experimentos similares al presentado en esta tesis. Como se menciona en [Doros, G. & Lew, R. 2010] el ICC se utiliza frecuentemente en áreas tan diversas como la Epidemiología, Psicología, Sociología y Medicina para medir la confiabilidad y validez de las muestras, un ejemplo de ello se puede encontrar en [Tousignant, 2013] donde se describe la forma en que se utiliza el ICC como método para evaluar la confiabilidad y la validez de sus experimentos. Otro trabajo relacionado es el descrito en [Ferriero, 2011] donde se muestra un experimento en el que también se utiliza el ICC para evaluar tanto la validez como la confiabilidad de un dispositivo. Finalmente, en el trabajo presentado en [Gogia, P. 1987] se hace la evaluación de la confiabilidad y validez de medidas tomadas con el goniómetro universal para la articulación de la rodilla, en este

experimento también se utiliza el ICC para hacer comparaciones entre experimentos realizados por distintos especialistas para ver su grado de relación, tal y como se realiza en esta tesis para comparar las medidas hechas por distintos especialistas.

Por otro lado, el uso del ICC fue analizado y aprobado por el Subcomité de Enseñanza, Investigación y Ética del CMLALM nosocomio en el cual se realizó la mayoría de los experimentos. Es importante mencionar que este Subcomité enfatiza la obligación y cumplimiento de puntos tales como: criterios de inclusión, exclusión y eliminación, instrumentos de medición, procedimientos, procesamiento de datos y diseño estadístico, implicaciones éticas y consentimiento informado, solo por mencionar algunos. En el Anexo C se presenta el consentimiento informado utilizado para los experimentos de esta tesis y en el anexo D se presenta el oficio de aceptación del protocolo de tesis por parte del Subcomité de Enseñanza, Investigación y Ética del CMLALM.

## 6.1 Descripción de los experimentos

La elección de las articulaciones analizadas se basa en dos criterios, el primero es que, hasta el momento, el sistema Kinect no permite la detección de todas las articulaciones del cuerpo humano y de las que es capaz de detectar no todas corresponden con las articulaciones anatómicamente aceptadas, esto se describe en [Borenstein, G. 2012], [HIG. 2012] y [Bockstege, B. 2011]. El segundo criterio es la postura y el tipo de movimiento que se requieren para la obtención del ROM de la articulación, ya que el sistema Kinect presenta algunas limitaciones bajo ciertas posturas del sujeto medido. Para el segundo criterio se utilizaron las recomendaciones de especialistas de Terapia Física del CMLALM y en los métodos y procedimientos descritos en [Taboadela, C. 2007] y [Norkin, C. C. 2009]. Adicionalmente, se busca que las articulaciones elegidas sean de distintas secciones del cuerpo del participante, en este caso se elige una de la parte superior (hombro) una de la parte media (codo) y finalmente una de la parte baja (cadera) para estudiar el comportamiento del sistema Kinect en cada área.

En la Tabla 9 se muestran los valores de interpretación del ICC extraídos de [Tousignant, 2013] donde se describe como se calculan y se utilizan.

Estudio	Bueno	Regular	Malo
Confiabilidad	$ICC \geq 0.75$	$0.40 \geq ICC \leq 0.75$	$ICC < 0.4$
Validez	$ICC > 0.65$	$0.50 \geq ICC \leq 0.65$	$ICC < 0.5$

Tabla 9: Valores de interpretación ICC

Así mismo, cabe resaltar que a pesar de que teóricamente el sistema Kinect no se ve afectado por zonas oscuras en la escena [Borenstein, G. 2012], todas las mediciones se hicieron con buenas condiciones de iluminación y con un fondo uniforme y claro.

En cada experimento se analizan los movimientos de tres articulaciones en distintas posturas: sentado de frente a la cámara, parado de perfil a la cámara y parado de frente a la cámara siempre que el movimiento, por su propia naturaleza, lo permita.

En la primer repetición de cada experimento el software del prototipo coloca una marca en pantalla, esta marca se toma como posición final y es a la que el participante deberá llegar en cada subsecuente repetición, de esta manera se asegura que el movimiento es uniforme durante la toma de muestras. También se ponen marcas en el piso y en el fondo de la escena que sirven de guía a los participantes para adoptar las posturas y realizar los movimientos adecuadamente.

## **6.2 Experimento 1: Confiabilidad**

El objetivo del primer experimento es calcular la confiabilidad del prototipo. Los resultados también permiten identificar las articulaciones y movimientos que tienen mejor desempeño, estos movimientos son los empleados en las siguientes evaluaciones. En este experimento colabora un grupo de cinco estudiantes de la FI de la UAEM.

### **6.2.1 Criterios de inclusión**

Para este experimento se requiere la elección de los *participantes* y se consideran los siguientes criterios.

#### 6.2.1.1 Criterios de inclusión

- Edad entre 18 y 50 años.
- Sujetos sanos.
- Que hablen español.
- Delgados.
- Ropa ajustada.

#### 6.2.1.2 Criterios de exclusión

- Se excluyen participantes con patologías articulares.
- Sujetos con los cuales, por alguna razón, no se finaliza el experimento.

6.2.1.3 Criterios de eliminación

- Personas con alguna discapacidad física, motora o mental.
- Que los familiares se nieguen a que el sujeto participe en el experimento.

**6.2.2 Método**

Se analizan los movimientos de cinco participantes de la FI, tres hombres y dos mujeres, con edades de entre veintiséis y treinta años los cuales son alumnos de maestría de dicha institución. El operador del sistema fue un miembro del equipo de desarrollo con conocimiento de la teoría que se requieren para la toma de ROMs de las articulaciones y que se describe en la teoría goniométrica.

En la Tabla 10 se muestra un resumen de los movimientos que se realizan en este experimento, en esta tabla, un *No* indica que, por la propia naturaleza del movimiento, no se realiza el experimento, un *Si* indica que si se realiza la prueba.

Articulación	Movimiento	Parado	Perfil	Sentado
Cadera	Abducción	Si	Si	No
	Aducción	Si	Si	No
	Rotación interna	No	No	Si
	Rotación externa	No	No	Si
Codo	Flexión	Si	Si	Si
	Extensión	Si	Si	Si
Hombro	Abducción	Si	Si	Si
	Aducción	Si	Si	No
	Flexión	Si	Si	Si
	Extensión	Si	Si	Si
	Rotación interna	Si	Si	Si
	Rotación externa	Si	Si	Si

Tabla 10: Articulaciones y movimientos considerados en el experimento uno

De la Tabla 10 se puede deducir que en total se analizan 29 movimientos distintos para cada uno de los cinco participantes. Cada participante realiza 30 repeticiones por cada uno de los movimientos, por lo tanto, ya que se realizan dos series de movimientos, en total se realizan 1740 mediciones por participante.

### **6.2.3 Procedimiento**

Cada participante ejecuta dos series de medidas. Así mismo, para cada serie se realiza un total de 30 repeticiones por cada movimiento. Para simplificar, cuando la postura es de perfil, siempre se toma el lado derecho del participante con respecto a la cámara. El sujeto adopta la posición inicial de acuerdo al movimiento y hace el desplazamiento del miembro que corresponda. En la primer repetición, el prototipo implementado coloca una marca en la pantalla para guiar al participante, esto con objeto de asegurar que en cada repetición se realice el mismo desplazamiento. Adicionalmente, cuando el participante se encuentra realizando la prueba, el software del prototipo efectúa la validación de la posición, esto para evitar que el participante, inconscientemente, se mueva de su posición y haya sesgo en los datos capturados.

Al inicio del experimento, cada participante recibe una explicación del proceso de medición y se les indica la importancia de la precisión durante los movimientos, adicionalmente, se realizan ejemplos de medición, antes de realizar las tomas definitivas para el experimento.

Cada participante se presenta de manera individual, hasta que uno termina la primer prueba se procede con el siguiente. Cuando se termina la serie inicial con todos los participantes se repiten los movimientos, todo bajo el mismo esquema, para realizar la segunda serie. Por lo cansado y extenso del experimento, la toma de las medidas se realiza a lo largo de varios días.

### **6.2.4 Resultados**

Para los movimientos listados a continuación no se hicieron los cálculos del ICC ya que no se terminaron adecuadamente todas las repeticiones.

- Codo sentado flexión
- Hombro frente rotación externa
- Hombro frente rotación interna
- Hombro perfil rotación externa
- Hombro sentado rotación externa

- Hombro sentado rotación interna

El motivo detectado que evita terminar las pruebas para estos movimientos es que, el sistema Kinect pierde el seguimiento del participante, con lo que se desechan las medidas obtenidas y se tiene que realizar nuevamente la prueba desde el inicio. Para cada participante se hace un máximo de cinco intentos, si la prueba no se completa correctamente, entonces el movimiento se desecha. La Tabla 11 muestra los resultados obtenidos para los movimientos que sí se completan correctamente, marcados en color rojo se muestran los movimientos que, con base en los rangos de valores mostrados en la Tabla 9 presentaron los mejores resultados en su ICC para cada articulación.

Movimiento	Prueba uno		Prueba dos		ICC	95% IC para ICC	
	Media	Desviación	Media	Desviación		Inferior	Superior
Cadera frente abducción	17.73	4.51	18.00	5.09	0.97	0.784	0.99
Cadera frente aducción	21.95	4.38	21.18	3.99	0.98	0.86	0.99
Cadera perfil abducción	22.58	6.80	24.79	5.59	0.86	-0.25	0.98
Cadera perfil aducción	18.83	7.28	20.32	7.58	0.89	0.89	0.99
Cadera sentado rotación externa	25.10	11.52	26.06	11.67	0.96	0.96	1
Cadera sentado rotación interna	22.76	3.98	22.42	5.04	0.97	0.75	0.99
Codo frente extensión	24.70	8.46	25.23	8.68	0.99	0.90	0.99
Codo perfil extensión	27.81	9.92	27.49	10.00	0.96	0.66	0.99
Codo perfil flexión	100.29	19.50	99.46	21.10	0.99	0.28	0.99
Codo sentado extensión	26.45	10.69	27.39	10.94	0.98	0.86	0.99
Hombro frente abducción	68.08	15.78	68.39	15.87	1	0.99	1
Hombro frente aducción	27.04	3.43	27.33	3.36	0.93	0.39	0.99
Hombro frente extensión	26.34	1.92	26.03	2.16	0.55	-3.27	0.95
Hombro frente flexión	80.74	9.75	80.65	9.69	0.99	0.97	1
Hombro perfil abducción	58.45	21.86	57.97	22.90	0.99	0.98	1
Hombro perfil aducción	24.46	10.68	24.08	11.08	0.99	0.99	1
Hombro perfil extensión	26.24	9.12	26.34	9.60	0.99	0.93	0.99
Hombro perfil flexión	64.46	22.98	64.77	23.18	0.99	0.98	1
Hombro perfil rotación interna	53.82	10.07	53.86	8.97	0.99	0.92	0.99
Hombro sentado abducción	67.10	10.90	67.91	9.90	0.99	0.90	0.99
Hombro sentado extensión	26.86	5.75	25.62	6.09	0.84	-0.52	0.98
Hombro sentado flexión	110.95	21.57	111.98	21.41	0.99	0.97	1

*Tabla 11: Resultados de la parte uno del experimento*

Como se puede apreciar en la Tabla 11, los valores de los ICC son buenos para la mayoría de los movimientos, con excepción del movimiento hombro-extensión-frente que obtuvo el peor resultado con un ICC de 0.55, el cual, según la Tabla 9, se considera regular.

## **6.3 Experimento 2: Independencia entre especialistas**

El objetivo del segundo experimento, es determinar el grado de independencia que tienen las mediciones hechas entre distintos especialistas, cuando se utiliza el prototipo desarrollado. En este experimento se cuenta con la participación de tres especialistas del CMLALM y seis participantes sanos. Además, se basa en los resultados obtenidos en el primer experimento donde se elige, por articulación, el movimiento con mejor valor ICC.

### **6.3.1 Criterios de inclusión**

Para este experimento, se hace una elección de los participantes y los especialistas. Para el caso de los participantes, se utilizan los mismos criterios de inclusión del experimento uno. Para los especialistas se consideran los siguientes criterios:

#### 6.3.1.1 Criterios de inclusión para especialistas

- Especialista en Traumatología, Reumatología o Terapia Física.
- Especialista adscrito a la especialidad.

#### 6.3.1.2 Criterios de exclusión

- No se admiten residentes o practicantes

#### 6.3.1.3 Criterios de eliminación

- Que, por alguna razón, no puedan finalizar el experimento.

### **6.3.2 Método**

Se analizan los movimientos de seis participantes tres hombres y tres mujeres, con edades de entre veintiséis y cuarenta años, los cuales son trabajadores administrativos del CMLALM, todos voluntarios, que firman una hoja de consentimiento informado y no reciben ningún pago o compensación por su participación. El operador del sistema es un miembro del equipo de desarrollo del proyecto. Los especialistas en Terapia Física del CMLALM validan las posiciones que los participantes adoptaban para las mediciones.

La Tabla 12 muestra el resumen de los movimientos en estudio. Tres especialistas evalúan a cada participante y se toman 26 repeticiones de cada movimiento.

<b>Articulación</b>	<b>Movimiento</b>	<b>Posición</b>
Cadera	Aducción	Parado de frente
Codo	Flexión	Parado de perfil
Hombro	Abducción	Parado de frente

*Tabla 12: Articulaciones y movimientos considerados en el experimentos formal*

### **6.3.3 Procedimientos**

El experimento se debe realizar validando que ambas posiciones, la inicial y la final, sean correctas, esto lo realizan los especialistas que participan en el proyecto. El participante adopta la posición inicial de acuerdo al movimiento y la postura, posteriormente, hace el desplazamiento del miembro que corresponda. Debido a que son muchos movimientos y repeticiones, no se hace el desplazamiento hasta el máximo rango posible, sino hasta una posición intermedia, donde el participante se sienta cómodo para realizar adecuadamente todas las repeticiones.

Cada participante recibe una explicación del proceso de medición y se les indica la importancia de la precisión durante los movimientos, adicionalmente se realizan ejemplos de medición antes de realizar las tomas para el experimento, de la misma manera, el proceso y los objetivos también son presentados a los especialistas que participaron en el proyecto. Aunque ellos no son los operadores del prototipo, se les da una explicación de su funcionamiento para obtener sus comentarios y sugerencias.

Se cita a cada participantes en horario distinto, para evitar distracciones, esperas innecesarias y que algún participante aprenda o practique en base a examinar lo que otros hacen. La prueba se realiza de manera individual, hasta que uno termina se procede con el siguiente. A diferencia del experimento uno, en este caso había la posibilidad de tomar las medidas a un participante, relativas a un movimiento y seguir con otro el mismo día, eso es porque, en este caso, se depende del tiempo de los especialistas y de los participantes.

Dado que las medidas son hechas respetando el criterio de los propios especialistas y participantes, se permite que tomen diferentes rangos de ángulo para cada movimiento. En la Tabla 13 se muestra un ejemplo de los resultados obtenidos dada esta situación:



Cadera aducción de frente			
	Especialista uno	Especialista dos	Especialista tres
Participante uno	20.96	27.26	41.50

Tabla 13: Promedios de las medidas de cada especialista

Ya que las medias obtenidas para cada serie de mediciones es diferente, esto no permite tener una base comparativa válida de los datos medidos por cada especialista y ocasiona que el ICC sea incorrecto. Para solucionar este detalle, los datos relativos a cada especialista se someten a un pre-tratamiento (normalización), haciéndolos independientes del ángulo que se mide y centrando el cálculo del ICC en la variabilidad de dichos datos, de esta manera se puede hacer el cálculo del ICC en base al error de medición. La meta en este caso, es diagnosticar la variabilidad entre especialistas utilizando los datos normalizados y obtener el grado de correlación entre sus mediciones, tal y como se describe en [García, D. 2013].

La Ecuación 2 muestra la fórmula utilizada para la normalización de los datos.

$$S'(t) = \frac{S(t) - \mu(t)}{\sigma(t)} \quad (2)$$

Donde  $S'(t)$  representa el dato normalizado en el instante  $t$ ,  $S(t)$  representa el dato sin normalizar en el instante  $t$ ,  $\mu(t)$  es la media del grupo de datos obtenidos y  $\sigma(t)$  su desviación estándar.

### 6.3.4 Resultados

En las tablas 14, 15 y 16 mostradas a continuación se presentan los resultados de las comparaciones hechas entre los especialistas, como se menciona anteriormente los cálculos se hacen con datos normalizados y no con los datos originales.

Movimiento	ICC	95% IC para ICC	
		Inferior	Superior
Cadera frente aducción	0.99	0.98	0.99
Codo perfil flexión	0.98	0.97	0.99
Hombro frente abducción	0.98	0.95	0.99

*Tabla 14: Comparación entre el especialista uno y el especialista dos*

Movimiento	ICC	95% IC para ICC	
		Inferior	Superior
Cadera frente aducción	0.89	0.76	0.95
Codo perfil flexión	0.91	0.81	0.96
Hombro frente abducción	0.97	0.95	0.99

*Tabla 15: Comparación entre el especialista uno y el especialista tres*

Movimiento	ICC	95% IC para ICC	
		Inferior	Superior
Cadera frente aducción	0.88	0.74	0.94
Codo perfil flexión	0.91	0.80	0.96
Hombro frente abducción	0.96	0.91	0.98

*Tabla 16: Comparación entre el especialista dos y el especialista tres*

Se puede apreciar que los valores del ICC son buenos en todos los movimientos analizados, siendo el movimiento de la cadera el que presenta los valores más bajos, con un promedio de 0.92, mientras que el hombro presenta los mejores resultados con un promedio de 0.97 en su ICC calculado.

## 6.4 Experimento 3: Validez

Este experimento tiene como objetivo evaluar la validez de las mediciones hechas utilizando el prototipo desarrollado. Este experimento también se realiza en las instalaciones del CMLALM con la colaboración de un especialista en Terapia Física y seis participantes sanos.

Los criterios de inclusión para los participantes y el especialista de este experimento son los mismos que en los experimentos uno y dos.

### 6.4.1 Procedimientos

Para este experimento, el especialista toma la medida con el goniómetro universal, posteriormente, se toma la misma medida utilizando el prototipo desarrollado, el especialista valida las posiciones inicial y final de cada movimiento, para que coincidan con la medida realizada con el goniómetro. Una vez que ambas medidas se han tomado, el operador del sistema captura la medida manual y guarda los datos. Posteriormente, se realizan los cálculos para obtener el ICC entre los datos obtenidos manualmente contra los obtenidos mediante el sistema Kinect para cada movimiento.

### 6.4.2 Resultados

Los resultados de esta parte se muestran en la Tabla 17. Como se puede apreciar, los valores del ICC son malos según los criterios mostrado en la Tabla 9. En el capítulo siguiente se describe esta problemática y su posible solución.

Movimiento	Kinect		Manual		ICC	95% IC para ICC	
	Media	Desviación	Media	Desviación		Inferior	Superior
Cadera frente aducción	29.36	10.18	19.00	0.89	0.20	-4.67	0.88
Codo perfil flexión	138.57	11.57	136.00	11.04	0.09	-5.50	0.87
Hombro frente abducción	93.70	8.08	90.33	0.81	-0.03	-6.42	0.85

Tabla 17: Resultados del ICC para la validez de los datos

# **Capítulo 7: Conclusiones y trabajo futuro**

---

## **7.1 Conclusiones**

En base a los resultados obtenidos a partir de los experimentos realizados para evaluar el prototipo de goniómetro digital, se llega a las siguientes conclusiones.

### **7.1.1 Conclusiones para la Hipótesis**

Los resultados obtenidos en los experimentos uno y tres permiten responder la hipótesis planteada en esta tesis como se comenta a continuación:

#### **7.1.1.1 Confiabilidad**

Con base en los resultados del experimento uno, se confirma una buena correlación entre las medidas tomadas a los participantes, por lo tanto, se puede concluir que, la confiabilidad de las ROMs tomadas utilizando el sistema Kinect es buena con un valor ICC de 1 para el mejor movimiento, que fue hombro-abducción-frente y un ICC de 0.55 para el peor resultado correspondientes al movimiento hombro-extensión-frente.

Dados estos resultados, tal como se muestran en la Tabla 11, se deduce que se presenta un mejor comportamiento cuando el participante se encuentra de frente a la cámara y no hay un traslape durante la ejecución del movimiento.

### 7.1.1.2 Validez

En el caso de la validez, se puede notar que los resultados del ICC calculados son malos, según la Tabla 9, donde se dan los valores de comparación. Sin embargo, no se pueden hacer generalizaciones ya que el experimento tres demuestra que las medidas tomadas con un goniómetro universal no son un buen estándar de comparación para validar la medidas obtenidas con el sistema Kinect en base a los siguientes factores.

1. Durante los experimentos, se noto que los criterios de los especialistas pueden variar y esto arroja resultados inconsistentes entre una medición y otra.
2. Durante los experimentos, se noto que al realizar las medidas de los ROMs de forma manual es frecuente que los especialistas hagan un redondeo o una aproximación, incluso que hagan medidas “a simple vista”. Lo que provoca pequeños sesgos en las mediciones.
3. Como se ha comentado a lo largo del texto, las articulaciones obtenidas con el sistema Kinect no corresponden fielmente a las utilizadas para posicionar el goniómetro universal y tomar la medida. La Figura 39 muestra estas diferencias que al analizarlas visualmente parecen pequeñas y sin embargo, pueden cambiar el ángulo obtenido.

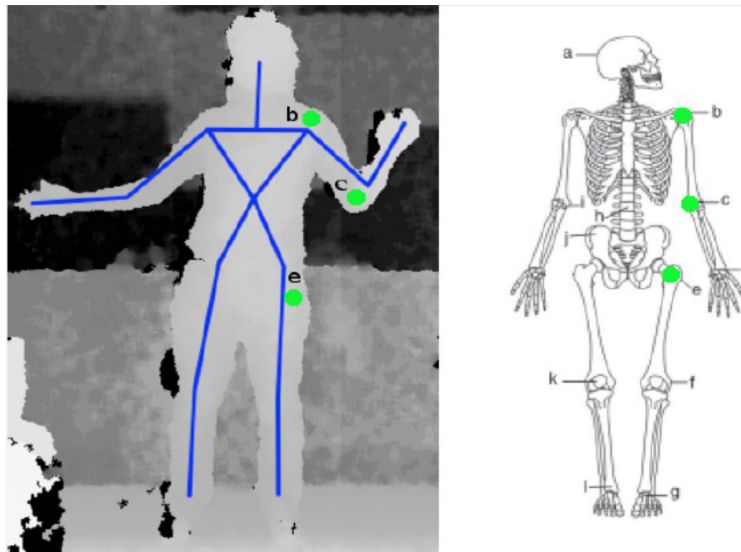


Figura 39: Diferencias entre las articulaciones Kinect y las anatómicas

Dados los puntos anteriores, se recomienda usar otro sistema de referencia, por ejemplo otro sistema de visión comercial como el Xsense [Xsens, 2014] o Vicon [Vicon, 2014].

## **7.1.2 Resultados por objetivos**

### 7.1.2.1 Objetivo principal

El objetivo principal de la tesis consiste en diseñar e implementar un prototipo de goniómetro digital que utilice una computadora y el sistema Kinect. A lo largo de este documento, se describe como se desarrolla el prototipo desde el análisis, desarrollo y construcción. Así mismo, el prototipo permite la realización de los tres experimentos que se han descrito en el capítulo 6, con lo que se puede asumir que este objetivo se cumple adecuadamente.

### 7.1.2.2 Objetivos secundarios

Para los objetivos secundarios correspondientes a los descritos en la sección 1.6, las conclusiones son las siguientes:

1. Como se ha descrito anteriormente, existen limitaciones relacionadas con la postura y movimientos realizados por los participantes, a la hora de ser medidos, ya que, si existe traslape entre las articulaciones, el sistema Kinect suele perder el seguimiento del cuerpo del participante.
2. El sistema Kinect no contempla todas las articulaciones anatómicas del cuerpo humano, tales como las de manos, muñecas y pies, así mismo, hay algunas como la del cuello que, aunque si se detecta, no es posible calcular el ROM de todos sus movimientos.
3. El tercer objetivo consiste en que el prototipo no incluya métodos invasivos al participante, para poder realizar la toma de la ROM de una articulación determinada. Dada la forma de trabajo del sistema Kinect se puede concluir que este objetivo se ha alcanzado satisfactoriamente.
4. La evaluación de la confiabilidad y la validez coincide con la respuesta a la hipótesis planteada, cuyas conclusiones se analizan anteriormente en esta misma sección.
5. Para este objetivo, se realiza el experimento dos, descrito en el capítulo 6, donde se hacen comparaciones entre las medidas tomadas por distintos especialistas, para determinar si, utilizando el sistema Kinect, es posible que haya independencia de las medidas con respecto a quien las toma. Dados los resultados de las tablas 14, 15 y 16 podemos concluir que el uso del sistema Kinect como goniómetro digital cumple con esta característica.

## **7.2 Aportes**

La realización de esta tesis ha generado diversos aportes a los distintos ámbitos con los que esta relacionada, tal como se describe a continuación.

### **7.2.1 Uso del sistema Kinect como goniómetro digital**

Aunque existen bastantes publicaciones en las cuales se utiliza el sistema Kinect como herramienta de apoyo a distintas áreas medicas, tales como la rehabilitación y la Terapia Física, en el estado del arte revisado hasta el momento, no se encuentra evidencia de algún trabajo similar al propuesto en esta tesis.

### **7.2.2 Diseño de filtro**

Se diseño e implemento un filtro digital, para mejorar la estabilidad de las muestras de las posiciones articulares del sujeto a medir. Al analizar los resultados de las primeras pruebas, se pudo apreciar la variabilidad de las medidas tomadas, por este motivo se hizo el diseño del filtro digital que mejora las señales obtenidas.

### **7.2.3 Evitar el uso de método invasivos**

Con el prototipo de goniómetro digital desarrollado, se puede apreciar que el sistema Kinect, trabajando en una escena con un fondo uniforme y bajo ciertas condiciones, puede detectar, con mucha facilidad y estabilidad, a los usuarios para la toma de las medidas requeridas, sin necesidad de colocar ningún dispositivo sobre el cuerpo del participante que ayude a la calibración.

### **7.2.4 Validez y confiabilidad**

El prototipo diseñado en esta tesis permite evaluar la validez y confiabilidad de las medidas obtenidas con el sistema Kinect. Se toma como referencia las medidas hechas por especialistas del CMLALM, sin embargo, este prototipo se puede utilizar para comparar las medidas del sistema Kinect con otros dispositivos, tales como teléfonos celulares que cuentan con aplicaciones de goniómetro digital [Ferriero, 2011], radiografías para medir los ROMs de los participantes [Brosseau, 1997] u otros sistema de visión comercial como el Xsense [Xsens, 2014] o Vicon [Vicon, 2014].

### **7.2.5 Homogeneizar la medición del ROM**

Con el desarrollo del prototipo de goniómetro digital y en base a los datos obtenidos de una misma articulación, con el mismo movimiento y bajo las mismas circunstancias, se obtienen resultados más homogéneos entre distintos especialistas, haciendo las mediciones independientes de los métodos y criterios que utilicen.

### **7.2.6 Colaboración interdisciplinaria**

Para poder realizar el experimento con especialistas, fue necesario culminar una serie de tramites para que el protocolo de tesis fuera evaluado y aceptado por el Subcomité de Enseñanza, Investigación y Ética del CMLALM, así mismo el protocolo de investigación fue revisado por un especialista en Traumatología y Ortopedia y por uno de Reumatología. Posteriormente, las pruebas fueron realizadas en colaboración con especialistas en Terapia Física, también adscritos a dicha institución.

Todo esto es de gran importancia, por la participación interdisciplinaria que permite mejorar el proyecto desde distintos puntos de vista y abre las puertas para trabajos futuros ya sea sobre la misma línea de investigación o con temas afines.

## **7.3 Trabajo futuro**

Partiendo del prototipo de goniómetro digital diseñado e implementado en esta tesis, se pueden desglosar distintos proyectos, que mejoren o complementen el prototipo desarrollado. A continuación se presentan algunas sugerencias.

### **7.3.1 Estabilidad del sistema**

Mejorar la estabilidad del sistema cuando el usuario ya ha sido detectado. En algunas ocasiones, cuando el usuario esta en cualquier parte del proceso de medición, el sistema Kinect pierde el seguimiento del participante, esto hace que se tenga que repetir todo el proceso para poder tener una medida adecuada. Este es un efecto no deseado, que causa molestias a los tres actores del proceso (participante, especialista y operador del sistema) además de que retrasa la toma de la medida. Si se quiere mejorar el prototipo y realizar un goniómetro que se pueda llegar a utilizar en el área médica, es necesario corregir esta debilidad del sistema Kinect.



### **7.3.2 Agregar articulaciones**

Para esta tesis se consideran tres articulaciones: cadera, codo y hombro, para continuar con el proyecto, se tiene que analizar el comportamiento del prototipo con más articulaciones tales como rodilla, cuello, muñeca, etc. Esto se puede hacer considerando los métodos aquí utilizados para evaluar la confiabilidad y validez con respecto a estas articulaciones.

Por otro lado, para aquellas articulaciones no soportadas por la librería OpenNI, se requiere desarrollar los algoritmos necesarios para detectarlas. Un trabajo interesante al respecto es el [Oikonomidis, 2012] en el que se hacen avances para detectar las articulaciones de los dedos de las manos utilizando el sistema Kinect y la librería OpenNI.

### **7.3.3 Medir al participante con distintas posturas**

Un trabajo muy importante a considerar es el manejo de pacientes acostados. Para cumplir con los objetivos de esta tesis se utilizaron tres posiciones dos de pie (de frente y de perfil al sistema Kinect) y una sentado (de frente al sistema Kinect), sin embargo otra posición muy utilizada para algunos movimientos en goniometría es con el participante acostado, ya sea boca arriba o boca abajo. Tomando en cuenta la forma de trabajo del sistema Kinect, por el momento no es posible considerar la esta posición ya que se pierde estabilidad y el sistema no es capaz de identificar adecuadamente cada parte del cuerpo del participante.

### **7.3.4 Interfaz de usuario**

La interfaz de usuario utilizada por el prototipo aquí desarrollado se hizo con el objetivo de realizar los experimentos necesarios para cumplir con las metas planteadas en nuestro protocolo. Esta interfaz es adecuada para la toma de muestras y la comparación de resultados, sin embargo, resulta inapropiada si pensamos en un goniómetro digital que será usado en la práctica clínica. Es por eso que resulta necesaria una nueva interfaz que cumpla con lo necesario para que sea de utilidad a los especialistas y facilite su trabajo.

## Referencias

- Cynthia C. Norkin, D. Joyce White (2009), Measurement of Joint Motion: A Guide to Goniometry, F. A. Davis Company, 9780803623477.
- Greg Borenstein (2012), Making Things See: 3D Vision with Kinect, Processing, Arduino, and MakerBot, O'Reilly Media, Incorporated, 9781449307073.
- Microsoft (2012), Human Interface Guidelines, Microsoft Corporation, .
- Ben Bockstege, Aaron Huus (2011), Measuring the Performance of the Microsoft Kinect, University of Notre Dame, .
- Claudio H. Taboadela (2007), Goniometría una herramienta para la evaluación de las incapacidades laborales, Asociart ART, 978-987-9274-04-0 .
- Jeff Kramer, Nicolas Burrus (2012), Hacking the Kinect, Apress Berkely, CA, USA, 9781430238676.
- S. Sastre Fernández (1991), Fisioterapia del pie podología física, Barcelona: Publicaciones Universitarias, 9788478756674.
- Van Deusen, J. and Brunt, D. (1997), Assessment in occupational therapy and physical therapy, Ed. W.B. Saunders Company, 9780721644448.
- Melgar, E.R. and Diez, C.C. (2012), Arduino and Kinect Projects: Design, Build, Blow Their Minds, Apress, 9781430241676.
- I.P. Tharindu Weerasinghe, Janaka Y. Ruwanpura, Jeffrey E. Boyd; and Ayman F. Habib (2012), Application of Microsoft Kinect sensor for tracking construction workers, Construction Research Congress, .
- Shahram Izadi (2012), KinectFusion: Real-time 3D Reconstruction and Interaction Using a Moving Depth Camera, ACM Symposium on User Interface Software and Technology, .
- Fredrik Ryd' en, Howard Jay Chizeck, Sina Nia Kosari, Hawkeye King and Blake Hannaford (2011), Using Kinect and a Haptic Interface for Implementation of Real-Time Virtual Fixtures, University of Washington , .
- Kathryn LaBelle (2011), Evaluation Of Kinect Joint Tracking For Clinical And In-Home Stroke Rehabilitation Tools, Indiana: Notre Dame, .
- Antonio Padilha Lanari Bo, Mitsuhiro Hayashibe, Philippe Poigne (2011), Joint Angle Estimation in Rehabilitation with Inertial Sensors and its Integration with Kinect, 33rd Annual International Conference of the IEEE EMBS, 1557-170X.
- Obdrzalek, S. and Kurillo, G. (2012), Accuracy and Robustness of Kinect Pose Estimation in the Context of Coaching of Elderly Population, 34th Annual International Conference of the IEEE EMBS, 1557-170X.
- Pastor Issac (2012), A Feasibility Study of an Upper Limb Rehabilitation System Using Kinect and Computer Games, Conf Proc IEEE Eng Med Biol Soc, 1557-170X.
- DrGoniometer: Disponible en [www.drgoniometer.com](http://www.drgoniometer.com), 7 Agosto 2014

Robbra Stockholm: Disponible en <http://robbrastockholm.com>, 7 Agosto 2014

iGonio, the goniometer on iPhone.: Disponible en <https://sites.google.com/site/igoniowebsite/home>, 7 Agosto 2014

Giorgio Ferriero, Francesco Sartorio (2011), Reliability of a New Application for Smartphones(DrGoniometer) for Elbow Angle Measurement, American Academy of Physical Medicine and Rehabilitation, 1934-1563.

Wendy Rheault, Michelle Miller (1988), Intertester Reliability and Concurrent Validity of Fluid-based and Universal Goniometers for Active Knee Flexion, Journal of the American Physical Therapy Association and Physical Therapy, 0031-9023.

Glosario fisioterapia: Disponible en <http://www.glosariofisioterapia.com/espasmo-muscular-protector/>, 7 Agosto 2014

John Satzinger y Robert Jackson (2010), Systems Analysis and Design In a changing world, Cengage Learning, 9781423902287.

Deitel, P and Deitel Harvey (2012), Java, How to program, Prentice Hall, 978-0-13-257566-9.

AO Foundation Transforming Surgery-Changing Lives: Disponible en <https://www.aofoundation.org/Structure/network/aospain/servicios/Pages/enlaces-de-interes.aspx>, 7 Agosto 2014

American Academy of Orthopaedic Surgeons: Disponible en <http://www.aaos.org/>, 7 Agosto 2014

Vantomme, Jan (2012), Processing 2: Creative Programming Cookbook, Packt Pub, 978-1-849517-94-2.

PostgreSQL: Disponible en <http://www.postgresql.org/about/>, 7 Agosto 2014

OpenNI: Disponible en <http://www.openni.org/>, 7 Agosto 2014

Brekel Tools for Kinect markerless motion capture: Disponible en <http://www.brekel.com/kinect-3d-scanner/installation-instructions/>, 7 Agosto 2014

Simple-OpenNI: Disponible en <http://code.google.com/p/simple-openni/wiki/Installation>, 7 Agosto 2014

MathWorks: Disponible en <http://www.mathworks.com/products/matlab/>, 14 Abril 2014

Processing: Disponible en <http://processing.org/>, 14 Abril 2014

GP4: Disponible en <http://lagers.org.uk/g4p/ref/index.html>, 14 Abril 2014

Gheorghe Doros & Robert Lew (2010), Design Based on Intra-Class Correlation Coefficients, Boston University, .

Tousignant-Laflamme (2013), Reliability and criterion validity of two applications of the iPhone™ to measure cervical range of motion in healthy participants, J Neuroeng Rehabil, 1743-0003.

Ferriero, G and Sartorio, F. (2011), Reliability of a New Application for Smartphones(DrGoniometer) for Elbow Angle Measurement, Istituto Scientifico di Veruno, 1934-1563.

Prem P Gogia & James H Braatz (1987), Reliability and Validity of Goniometric Measurements at the

Knee, Phys Ther, .

García, Diego & Fernando, J. (2013), Array of Hall Effect Sensors for Linear Positioning of a Magnet Independently of Its Strength Variation, *Sensors*, 1424-8220.

Xsens – the leading innovator in 3D motion tracking technology.: Disponible en <http://www.xsens.com/>, 5 Julio 2014

Vicon: Disponible en <http://www.vicon.com/>, 5 Julio 2014

Brosseau, L. and Tousignant, M. (1997), Intratester and intertester reliability and criterion validity of the parallelogram and universal goniometers for active knee flexion in healthy subjects., *US National Library of Medicine*, 1471-2865.

Oikonomidis, I. and Kyriazis, N. (2012), Efficient Model-based 3D Tracking of Hand Articulations using Kinect, *BMVA Press*, 1-901725-43-X.

Consuelo, J (2007), Software de simulación en 3D de modelos geométricos y cinemáticos de robots, *Universidad Autónoma del Estado de México*, .

John Satzinger y Robert Jackson (2010), *Systems Analysis and Design In a changing world*, Cengage Learning, 9781423902287.

Proakis, J.G. and Manolakis, D.G. (2006), *Digital Signal Processing*, Pearson Prentice Hall, 978-0131873742.

Gómez, E. (2009), *Introducción al filtrado digital*, Escola Superior de Musica de Catalunya, Curso 2009-2010.

# **Anexo A: Unified Modeling Language**

## **UML**

---

Un sistema es un conjunto de componentes que interactúan para resolver un problema. Todos los sistemas se componen de dos partes [Deitel, Paul 2012]:

1. **Estructura.**- Describe todos los objetos de que se compone el sistema y la relación que existe entre ellos.
2. **Comportamiento.**- Describe como el sistema cambia y como interactúan sus objetos.

El estándar denominado *lenguaje unificado de modelado* (UML, por sus siglas en Inglés) especifica 13 tipos de diagramas para documentar el modelado de sistemas, de los cuales, seis diagramas son para representar la estructura desde diferentes puntos de vista y los otros siete para representar el comportamiento del mismo.

Grady Booch, Ivar Jacobson y Jim Rumbaugh son los impulsores de UML, así mismo, varias empresas como IBM, Oracle, Microsoft y Hewlett-Packard, han participado en su desarrollo.

UML cuenta con una gran cantidad de herramientas para facilitar y documentar adecuadamente el modelo de un sistema, entre los más importantes se encuentran los diagramas, ya sean estáticos o dinámicos, adicionalmente cuenta con elementos comunes a todos los diagramas tales como notas y/o dependencias [Consuelo, 2007].

En [Deitel, Paul 2012] se da una explicación y clasificación de tales elementos y diagramas. En esta tesis solo se mencionan aquellos que se utilizan en el desarrollo del software propuesto:

## A.1 Diagramas de clases.

Es clasificado como un diagrama de estructura estática. Está formado por elementos como clases y objetos y por las relaciones entre ellos, llamadas asociaciones. En la Figura 40 se muestra un diagrama de clases con la asociación de herencia.

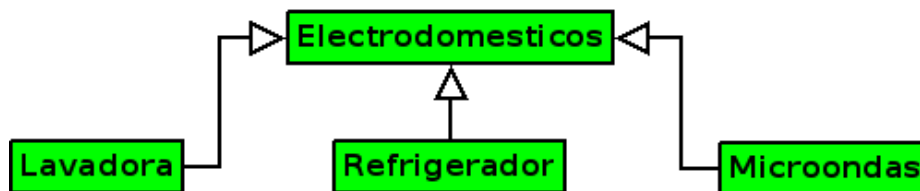


Figura 40: Representación de un diagrama de clases (herencia)

Hay dos formas de representar una clase utilizando la notación UML, la primera es mostrar únicamente el nombre de la clase dentro de un rectángulo. La segunda, mas completa, es mostrar el nombre de la clase, los atributos y las operaciones de la misma, dentro de un rectángulo y subdividido en tres partes, una para cada elemento. La Figura 41 muestra un ejemplo de la representación de una clase en UML.

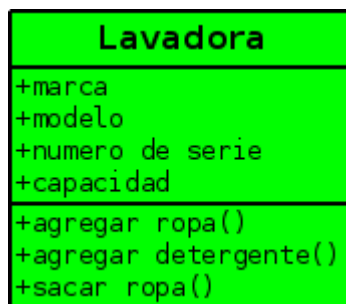


Figura 41: Representación de una clase en UML

Dentro de un diagrama de clases, cada una de ellas se relaciona con las otras clases, una línea recta forma esta relación la cual es llama asociación. Existen distintos gráficos que se utilizan para expresar las características particulares de cada asociación.

Los principales tipos de asociación son:

- Multiplicidad.
- Roles.
- Agregación.
- Herencia.

Para una explicación detallada de estas y otras asociaciones consulte [Deitel, Paul 2012] y [Satzinger, J. (2010)] donde se explican las características de cada una.

## A.2 Diagramas de casos de uso.

Este tipo de diagramas muestran las relaciones existentes entre los usos del sistema y los actores externos a él. La Figura 42 muestra un diagrama de caso de uso.

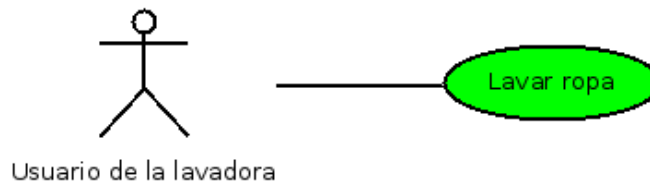


Figura 42: Representación de un caso de uso en UML.

Se utilizan frecuentemente para describir la forma en que se comporta el sistema, es decir, permite mejorar la comprensión de los requerimientos y son utilizados en la fase de análisis del software [Consuelo, 2007]. La Tabla 18 muestra la descripción de un caso de uso ficticio denominado *Lavar ropa*.

Caso de uso	Lavar ropa
Actor	Usuario de la lavadora
Propósito	Lavar ropa
Tipo	Primario
Descripción	Un usuario llega a hasta la lavadora con la ropa que lavará. La lavadora indica mediante señales los pasos que el usuario debe seguir. Al terminar la operación el usuario saca la ropa y se marcha.

Tabla 18: Representación de un caso de uso

Explicación del formato:

- **Caso de uso.**- Nombre del caso de uso.
- **Actores.**- Lista de agentes externos al sistema.

- **Propósito.**- Intención del caso de uso.
- **Descripción o resumen.**- Síntesis del caso de uso.
- **Tipos.**- Pueden ser esencial, real, primario, secundario u opcional.
- **Referencias cruzadas.**- Casos de uso y funciones relacionadas del sistema.

Los tipos de caso de uso se describen a continuación [Consuelo, 2007].

- **Casos de uso primarios.**- Representan los procesos comunes más importantes.
- **Casos de uso secundarios.**- Representan procesos menores o raros.
- **Casos de uso opcionales.**- Representan procesos que pueden no abordarse.

### A.3 Diagramas de actividades

Al igual que un diagrama de estado, uno de actividades modela el comportamiento del sistema. La diferencia es que un diagrama de actividades modela el flujo de trabajo o secuencia de eventos durante la ejecución del programa, también modela las acciones del objeto y en que orden las realiza. La Figura 43 muestra un ejemplo de diagrama de actividades.

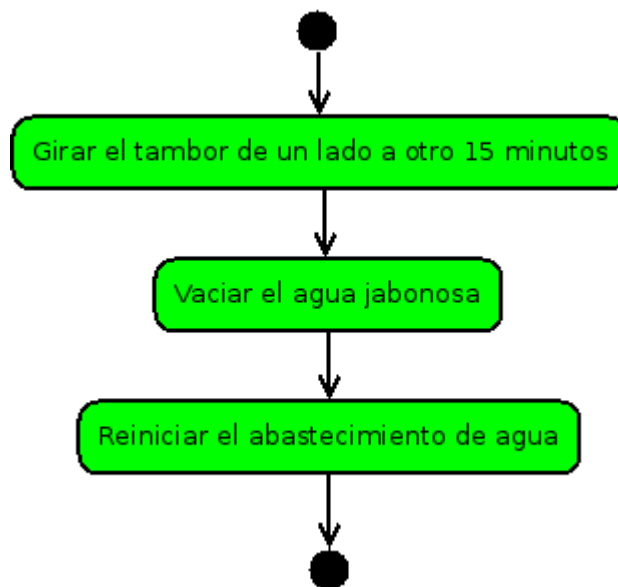
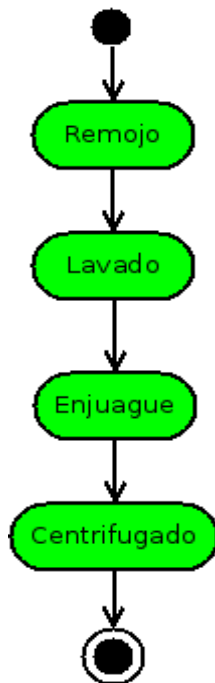


Figura 43: Representación de un diagrama de actividades



## **A.4 Diagramas de estado**

Cada objeto en un sistema pasa a través de varios estados. El estado de un objeto se determina por medio del valor de sus atributos en un momento dado en el tiempo. Un diagrama de estados modela un objeto y muestra bajo que circunstancias cambia dicho estado. La Figura 44 representa un ejemplo de diagrama de estado.



*Figura 44: Representación de un diagrama de estados*

## Anexo B: Filtro pasa bajas

---

La teoría de tratamiento de señales y en particular de los filtros digitales es demasiado larga y complicada para resumirla en un anexo, no es el objetivo de éste hacer una descripción detallada de los filtro digitales, solamente se hace referencia a algunos conceptos al respecto que son de utilidad para comprender el filtro diseñado en esta tesis. Para mas información consultar [Proakis, 2006] y [Gómez, 2009].

Un filtro es un proceso computacional o algoritmo mediante el cual una señal digital (secuencia de muestras) es transformada en una segunda secuencia de muestras o señal digital de salida [Gómez, 2009]. El funcionamiento básico de un filtro se puede representar como en la Figura 45.

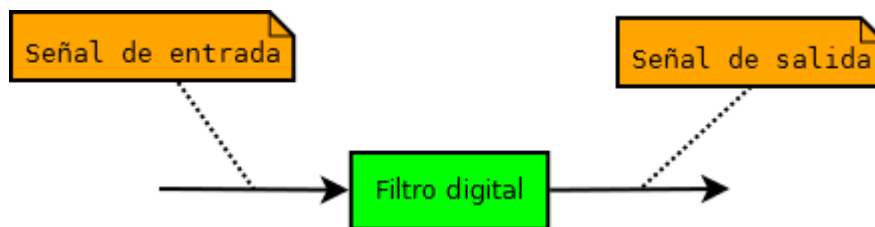


Figura 45: Modelo básico de un filtro

Como se menciona en [Gómez, 2009], un filtro es una señal de entrada  $x[n]$  que procesamos para generar una señal de salida  $y[n]$ . El espectro de la señal de salida  $Y(f)$  se obtiene multiplicando el espectro de la señal de entrada  $X(f)$  por la frecuencia del filtro  $H(f)$ , como se muestra en la ecuación 3:

$$Y(f) = X(f) \cdot H(f) \quad (3)$$

O en su representación de *convolución* mostrada en la Ecuación 4:

$$y[n] = x[n] * h[n] \quad (4)$$

Adicionalmente, se sabe que la aplicación de un filtro a una señal modifica su fase, lo que explica el comportamiento de las señales de entrada y salida del filtro donde se aprecia un retardo en la señal de salida con respecto al de la entrada.

Los filtros más utilizados son los filtros pasa bajas (Low Pass, LP), pasa altas (High Pass, HP), paso de banda (Band Pass, BP) y los filtros rechazo de banda (o paso no banda) (Band Reject, Band stop o Notch) [Gómez, 2009]. En la Figura 46 se representan estos 4 tipos de filtros mediante su respuesta en frecuencia o espectro de amplitud.

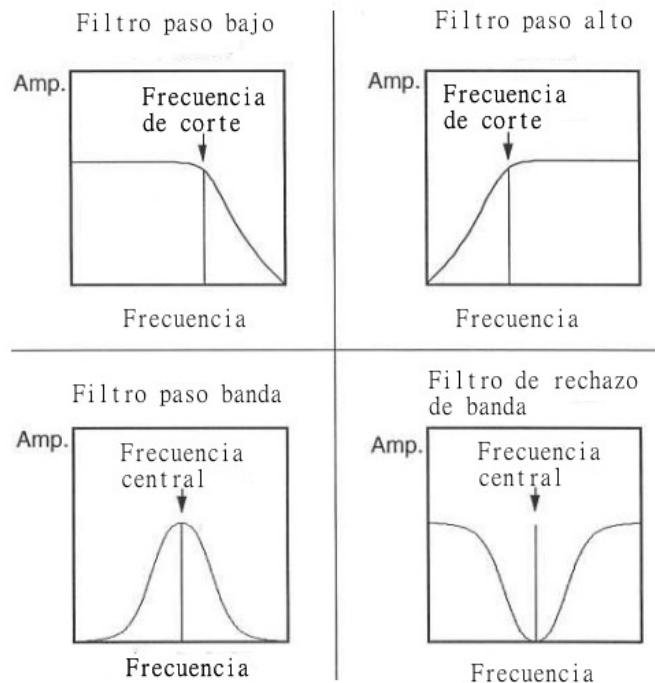


Figura 46: Tipos de filtros

- **Los filtros pasa bajas (LP)** dejan pasar las frecuencias que están por debajo de una determinada frecuencia. Están definidos por su frecuencia de corte.
- **Los filtros pasa altas (HP)** dejan pasar las frecuencias que están por encima de una determinada frecuencia. Están definidos por su frecuencia de corte.
- **Los filtros paso banda (BP)** dejan pasar las frecuencias que están situadas en una determinada banda de frecuencia, es decir, entre dos determinadas frecuencias. Están definidos por su frecuencia central y su ancho de banda que sería la diferencia entre las frecuencias de corte inferior y superior.
- **Los filtros rechazo de banda (BR)** dejan pasar todas las frecuencias excepto las que están situadas en una determinada banda de frecuencia, es decir, entre dos determinadas frecuencias  $f_1$  y  $f_2$ . Están definidos por su frecuencia central y

su ancho de banda que sería la diferencia entre las frecuencias de corte inferior y superior.

Los filtros pueden combinarse en serie o en paralelo para obtener respuestas frecuenciales más complejas. Por otro lado, el Orden de un filtro es el número de muestras anteriores a la actual para generar una muestra de salida.

Los filtros digitales pueden clasificarse en dos tipos que son los filtros de respuesta impulsional finita (Finite Impulse Response FIR) y los filtros de respuesta impulsional infinita (Infinite Impulse Response IIR) también denominados filtros recursivos o con feedback. En la Figura 47 se ilustran los diagramas de bloques de ambos filtros.

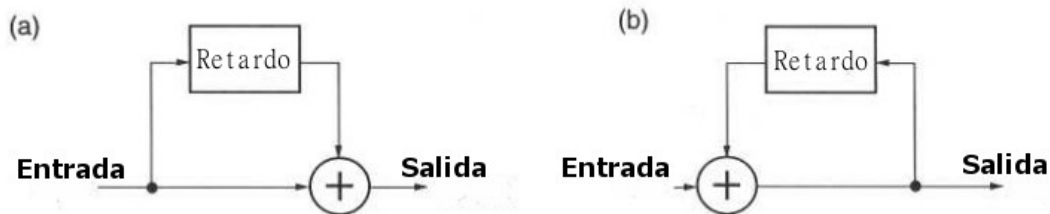


Figura 47: Diagrama de bloques de filtros (a) FIR y (b) IIR

- **Filtro FIR.-** Se retarda ligeramente una copia de la señal de entrada (de uno o varios periodos de muestreo) y se combina la señal de entrada retrasada con la nueva señal de entrada.
- **Filtro IIR.-** se retarda una copia de la señal de salida, la cual se combina con la nueva señal de entrada.

Como se describe en [Gómez, 2009] es posible describir los filtros mediante una ecuación que relaciona una señal de entrada con una señal de salida en el dominio digital. De ésta manera, la salida del filtro se especifica como un resultado de sumas, restas y multiplicaciones de muestras de entrada actuales y anteriores. A continuación se da una breve explicación de estas ecuaciones con respecto a los filtros FIR que son los utilizados en esta tesis.

## B.1 Filtros FIR

Una muestra de la salida se puede definir como una combinación lineal de muestras de la entrada presentes y pasadas. Podemos expresar esta relación como en la Ecuación 5:

$$y[n]=a_0 \cdot x[n]+a_1 \cdot x[n-1]+a_2 \cdot x[n-2]+\dots+a_N \cdot x[n-N] \quad (5)$$

La salida  $y[n]$  es igual a la suma de las muestras de la entrada actual  $x[n]$  multiplicada por el factor  $a_0$  y de todas las muestras anteriores hasta el instante  $[n-M]$  multiplicadas por su respectivo factor.

Los factores  $a_i$  son los coeficientes del filtro. Modificando estos coeficientes es posible variar las características del filtro. La serie de coeficientes  $a_0, a_1, \dots$  constituye la respuesta impulsional del filtro. De hecho, podemos verificar que la respuesta del filtro a la señal impulso (digital) de la Ecuación 6:

$$x=\{1,0,0,0,0,0,0, \dots\} \quad (6)$$

es la señal de salida de la Ecuación 7:

$$y=\{a_0, a_1, a_2, a_3, \dots, a_N, 0, 0, 0, \dots\} \quad (7)$$

lo cual explica la denominación de filtro a respuesta impulsional finita.

Los filtros FIR ofrecen una respuesta de fase más lineal y no entran jamás en oscilación (es decir, no se vuelven inestables), ya que no poseen realimentación. Por otro lado, requieren un gran número de términos en sus ecuaciones y eso les hace más costosos en cuanto a cálculo o carga computacional. Un filtro FIR con un corte muy abrupto (es decir, que tenga una banda de transición muy corta) puede requerir hasta centenas de retardos.

## ***Anexo C: Consentimiento informado***

---

En el este anexo se presenta el consentimiento informado utilizado para enterar a los participantes sobre las características de los experimentos que se requieren para llevar a cabo la evaluación del prototipo de goniómetro. Se presentan los objetivos, los riesgos y los acuerdos necesarios para dicha evaluación. Los participantes leyeron y firmaron el documento, dando así el permiso para que se les practiquen las mediciones necesarias, tanto de forma manual, utilizando el goniómetro universal, como con el prototipo implementado.

### **CONSENTIMIENTO INFORMADO**

**NOMBRE DEL PROYECTO:** Prototipo de un goniómetro digital empleando el sistema Kinect de Microsoft

**INVESTIGADOR PRINCIPAL:** Ing. José Ramón Consuelo Estrada

**CO-INVESTIGADOR:** Dr. en C. Otniel Portillo Rodríguez, Dr. en C. Jorge Rodríguez Arce.

**OBJETIVO.** Se ha solicitado su participación en este estudio de investigación que tienen como propósito evaluar la validez y confiabilidad de las medidas de los rangos de movimiento que son tomados mediante el prototipo de goniómetro que utiliza el sistema Kinect de Microsoft.

**NATURALEZA DEL ESTUDIO.** Se realizará una comparación de las medidas de los arcos de movimiento obtenidas entre el método tradicional y un prototipo de goniómetro digital que utiliza una computadora y el sistema Kinect de Microsoft.

**RIESGO PARA USTED.** Ninguno

**CONFIDENCIALIDAD.** Los resultados y la información que usted aporte, serán de uso

único y exclusivamente para investigación y se mantendrán como datos confidenciales. Sin embargo Ud. Debe saber que los investigadores autorizados y el personal médico que se encuentran al cuidado de su salud, tendrán acceso a los expedientes de la investigación. La privacidad y confidencialidad de los expedientes estarán protegidas por la ley. Los resultados de esta investigación pueden ser publicados, sin embargo, no incluirán nombre o cualquier otra información que pueda identificarlo.

**PARTICIPACION VOLUNTARIA Y RETIRO.** Su participación en el estudio es totalmente voluntaria. Usted es libre de elegir si participa o no en el estudio, en el entendido de que no habrá ninguna represalia o pérdida de sus beneficios si no se decide participar. Del mismo modo, en el momento que lo decida, puede retirarse de la investigación, únicamente deberá notificar al investigador sobre su decisión, sin que ello afecte de ninguna manera el tratamiento o atención medica a la cual tiene derecho como paciente del **Centro Médico “Lic. Adolfo López Mateos”**.

Antes de tomar su decisión, aclare cualquier duda que tenga respecto al estudio.

Al firmar esta carta, estoy de acuerdo en que:

- 1.- Leí o me leyeron en su totalidad y me explicaron esta forma de consentimiento informado y sobre el proyecto de investigación.
- 2.-Tuve la oportunidad de preguntar a una persona a cargo de la investigación y recibí respuestas satisfactorias.
- 3.- Tengo en mi poder una copia firmada de la forma de consentimiento informado.
- 4.-Se me preguntó a cerca de mi participación en esta investigación y entiendo los riesgos y beneficios; por ello doy libremente mi consentimiento para participar en el proyecto de investigación que se contiene en esta forma, bajo las condiciones que se indican.
- 5.- Entiendo que puedo rehusarme o retirarme de la investigación en cualquier momento y sin represalias.

Nombre del participante ó familiar responsable:

Firma: \_\_\_\_\_ Fecha: \_\_\_\_\_

Dirección \_\_\_\_\_ Teléfono: \_\_\_\_\_

**DECLARACION DEL INVESTIGADOR**

Ha tenido cuidado del explicar al paciente y/o familiar responsable de la naturaleza del protocolo. Certifico que con el mejor conocimiento se firmó esta forma de consentimiento, conociendo la naturaleza, riesgos, tratamiento y beneficios que me involucran al participar en este estudio. No hubo problema médico, barrera educacional o de idioma para impedir el claro entendimiento de los aspectos que se involucran en el estudio.

Firma \_\_\_\_\_

Fecha \_\_\_\_\_



## ***Anexo D: Oficio de aceptación del protocolo en el CMLALM***

---

El Centro Médico “Lic. Adolfo López Mateos” (CMLALM) tiene como propósito brindar atención de alta especialidad a personas que no cuentan con ningún tipo de seguridad social a través de una atención especializada de tercer nivel<sup>11</sup> con equipo de alta tecnología y personal con visión hacia la mejora de atención hospitalaria.

El CMLALM cuenta con especialidades como: Cirugía, Endoscopia, Urología, Otorrinolaringología, Oftalmología, Cardiología, Neurología, Nefrología, Traumatología y Ortopedia, Reumatología y Terapia Física, entre otras. Así mismo, el CMLALM es considerado como una institución que apoya la educación y formación de recursos humanos orientados al cuidado de la salud, permitiendo el desarrollo de diversos proyectos de investigación dentro de la institución.

Para poder registrar un proyecto de investigación, tal como la presente tesis, se requiere de la evaluación y aceptación del protocolo por parte del Subcomité de Enseñanza, Investigación y Ética del CMLALM

El la Figura 48 se presenta el oficio de aceptación del protocolo de esta tesis.

---

<sup>11</sup> Se considera atención de tercer nivel cuando el paciente requiere de atención médica de un especialista en un área específica.

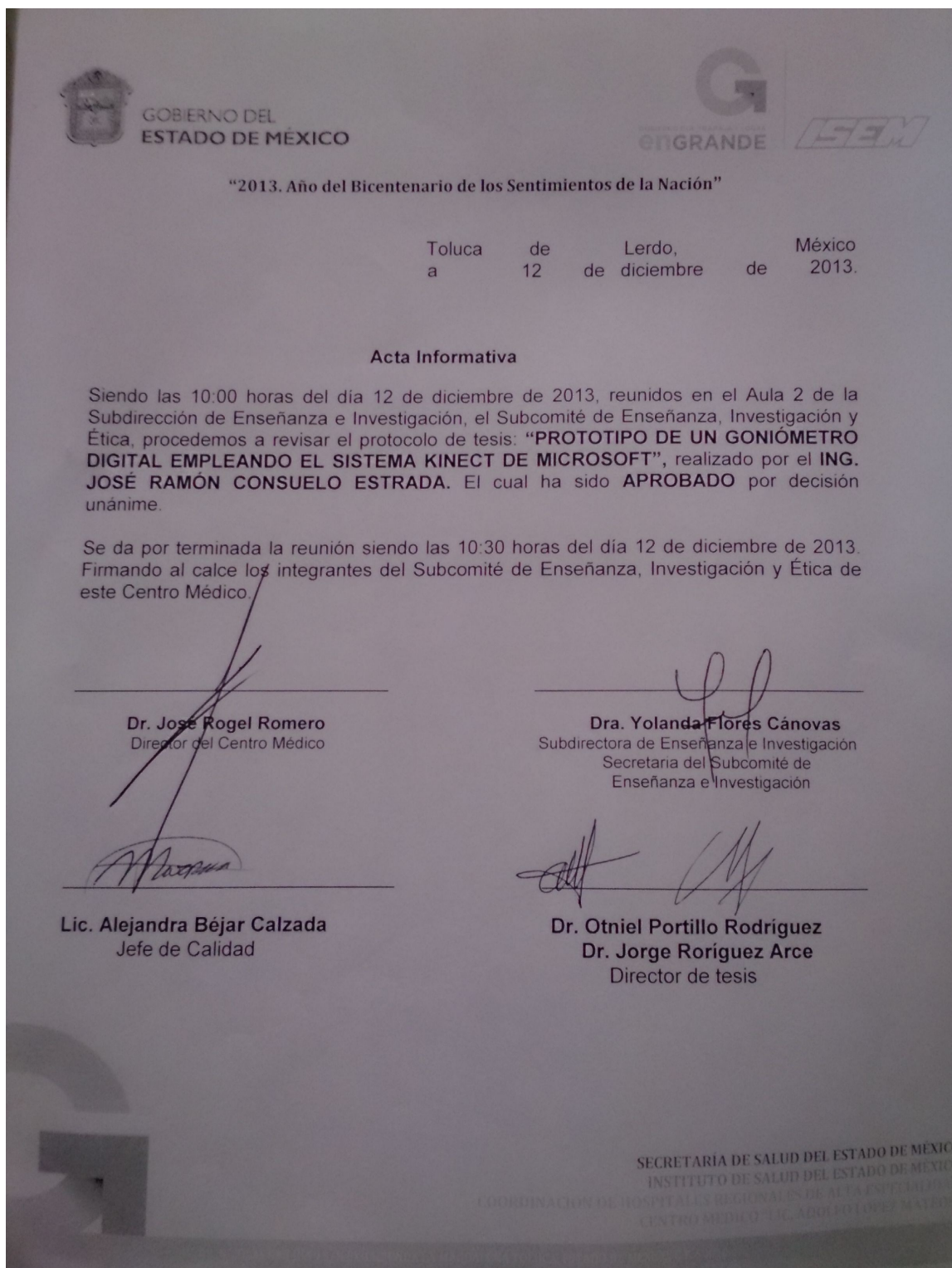


Figura 48: Oficio de aprobación del protocolo en el CMLALM