

UNIDAD PROFESIONAL INTERDISCIPLINARIA EN INGENIERÍA Y TECNOLOGÍAS AVANZADAS

Trabajo Terminal

**"Diseño y construcción de un prototipo de análisis
cinemático para atletas de remo bajo techo "**

**PARA OBTENER EL TÍTULO DE
INGENIERO EN BIÓNICA**

P R E S E N T A N:

**Jonatan Perea García
Hazur Sahib Socconini Alvarado**

ASEORES:

Dr. José de Jesús Medel Juárez

M. en C. Rafael Santiago Godoy

Dr. Gabriel Sepúlveda Cervantes



FEBRERO 15, 2011



UNIDAD PROFESIONAL INTERDISCIPLINARIA EN INGENIERÍA Y TECNOLOGÍAS AVANZADAS

Trabajo Terminal

**"Diseño y construcción de un prototipo de análisis
cinemático para atletas de remo bajo techo"**

**PARA OBTENER EL TÍTULO DE
INGENIERO EN BIÓNICA**

P R E S E N T A N:

**Jonatan Perea García
Hazur Sahib Socconini Alvarado**

SINODALES:

**Dr. Gabriel Sepúlveda
Cervantes**

**Dr. José de Jesús Medel
Juárez**

M. en C. Rafael Santiago Godoy

Presidente

Titular



**M en C. Enrique
García Tovar**

**M. en C. Adrián
Morales Blas**

FEBRERO 15, 2011

Índice general

1. Introducción	17
1.1. Antecedentes	23
1.2. Estado del arte	24
2. Objetivos	29
2.1. Objetivo General	29
2.2. Objetivos Particulares	29
3. Planteamiento del problema técnico	31
4. Justificación	33
5. Marco Teórico	35
5.1. Mecánica y descripción de los movimientos en el cuerpo biológico	36
5.1.1. Magnitudes escalares y vectoriales	36
5.1.1.1. Sistema internacional de unidades y dimensión	36
5.1.2. Vectores	37
5.1.2.1. Concepto de vector fijo, ligado o localizado	38
5.1.2.2. Vector libre	39
5.1.2.3. Vector deslizante	39
5.1.2.4. Operaciones básicas con vectores.	39

5.1.2.5. Producto de un vector por un escalar	39
5.1.2.6. Suma de vectores	40
5.1.3. Concepto de espacio vectorial	41
5.1.4. Cuaternión	42
5.1.4.1. Descripción de los cuaterniones	42
5.1.4.2. Generación del campo para cuaterniones	43
5.1.4.3. Matriz homogénea	44
5.1.4.4. Rotación	45
5.1.4.5. Algoritmo de Denavit-Hartenberg	49
5.2. Matemáticas aplicadas	52
5.2.1. Identidades trigonométricas	52
5.2.2. Método de diferencias finitas:	52
5.2.3. Análisis estadístico	55
5.2.3.1. Media aritmética	55
5.2.3.2. Rango promedio:	55
5.2.3.3. Media móvil simple de orden k:	55
5.2.4. Ángulos de Euler:	56
5.2.5. Ángulos de navegación (Tait-Bryan)	57
5.3. Biomecánica	58
5.3.1. Movimiento de los cuerpos en un sistema de referencia	59
5.3.2. Orientación del cuerpo móvil en el espacio	60
5.3.3. Tipos de movimientos según la trayectoria: rotación, traslación y mixtos . .	61
5.3.4. El esqueleto humano y sus movimientos	63
5.3.5. Posición anatómica y fundamental	63
5.3.6. Descriptores anatómicos	64

5.3.7.	Planos y ejes del movimiento	65
5.3.8.	Sistema biológico de estudio (sistema esquelético y sus articulaciones)	67
5.4.	Técnica deportiva	68
5.4.1.	Técnica de remo	69
5.4.2.	Fallos técnicos	71
5.5.	Hardware	75
5.5.1.	Microcontrolador Atmega48.	75
5.5.2.	Giróscopo ITG-3200	76
5.5.3.	Acelerómetro ADXL-345	78
5.5.4.	Módem Bluetooth SMiRF	80
5.6.	Puertos de comunicación	82
5.6.1.	Puerto serie RS-232	82
5.6.1.1.	Protocolo de comunicación RS-232 Asíncrona:	82
5.6.2.	Puerto serie I^2C	83
5.6.2.1.	Protocolo de comunicación I^2C :	84
5.7.	Circuito de alimentación	86
5.8.	Software	87
5.8.1.	Eagle	87
5.8.2.	Python	87
5.8.3.	L _X X	87
5.8.4.	Matlab	88
5.8.5.	MikroC Pro for AVR	88
5.8.6.	Panda 3D	88
5.8.7.	Blender	88

6. Desarrollo experimental	89
6.1. Modelo biónico	89
6.2. Sistema de medición	110
6.2.1. ETAPA A.- Diseño del circuito impreso	111
6.2.2. ETAPA B.-Fabricación de la placa electrónica	114
6.2.3. ETAPA C.- Programación del microcontrolador	116
6.2.4. ETAPA D.-Realización de pruebas y validación	118
6.3. Software de aplicación	123
6.3.1. Sistema Informático:	123
6.3.2. Configuración del sistema:	125
6.3.3. Modelo 3D	126
6.3.4. Interfaz gráfica de usuario (GUI)	131
6.3.5. Base de datos	131
6.3.6. Código del programa	131
7. Análisis e interpretación de resultados	133
7.1. Modelo Biónico	133
7.2. Sistema de medición	135
7.3. Interfaz gráfica	141
8. Conclusión	143
9. Trabajos Futuros	145

Índice de figuras

1.1. Atleta practicando remo, embarcación monoplaza de remos cortos	17
1.2. Máquina de remo o remo <i>Indoor</i> profesional CONCEPT2 D [7]	19
5.1. Suma geométrica de 2 vectores	40
5.2. Suma geométrica de más de dos vectores	41
5.3. Coordenadas de referencia asociado al cuerpo rígido [41].	45
5.4. Rotación sobre ejes canónicos [41].	47
5.5. Esquema de los ángulos de Euler y los ejes de coordenadas.	56
5.6. Ángulos de navegación o de Tait-Bryan	57
5.7. Sistema de referencia absoluto y relativo [34].	59
5.8. Orientación relativa a los ejes espaciales x,y, y z del cuerpo de un paragüista (A) y de un pie de bailarina (B) [34].	60
5.9. Los movimientos de rotación se producen sobre ejes articulares (A). Cuanto mayor es el radio de giro hay mayor trayectoria circular (B) [34].	61
5.10. Translación del centro de gravedad de una persona levantándose de una silla [34].	62
5.11. Movimientos combinados de rotación de las articulaciones de tobillo, rodilla y cadera translación (izq.) o del movimiento combinado de las articulaciones del hombro, codo y muñeca en la silla de rueda (der.) [36].	62
5.12. Esquema de la posición anatómica del cuerpo humano. [34].	63
5.13. Términos anatómicos utilizados para describir una dirección. [34]	64
5.14. Intersección de los planos anatómicos [34].	65
5.15. Fotografía del Atmega 48	75

5.16. Fotografía interna del sensor (der.) Esquema de las fuerzas de coriolis (izq.) [83]	76
5.17. Diagrama a bloques funcional del giróscopo ITG-3200 [83]	77
5.18. Fotografía interna del acelerómetro ADXL345 [94]	78
5.19. Diagrama a bloques funcional del acelerómetro ADXL-345 [82]	79
5.20. Tableta del módem Bluetooth [84]	80
5.21. Esquema de transmisión I^2C	84
5.22. Diferentes modos de operación del protocolo de comunicación I^2C	85
5.23. Batería de Polímero de Litio (Li-Po)	86
5.24. Circuito eléctrico de conexión del MAX1555 [81]	86
6.1. Esquema del atleta detallando la sección de estudio	91
6.2. Robot general del atleta de remo bajo techo	93
6.3. Segmentación del cuerpo humano en términos de la altura (H) [89].	106
6.4. Diagrama a bloques del sistema electrónico de medición.	110
6.5. Etapas de construcción del sistema electrónico de medición	110
6.6. Flujo de la información en el sistema electrónico.	111
6.7. Prototipo armado en protoboard para pruebas experimentales	111
6.8. Diagrama eléctrico del sistema de medición.	112
6.9. Diagrama eléctrico de la placa RN-41 Bluetooth [92]	112
6.10. Diagrama esquemático de la placa para el giróscopo ITG-3200 [91]	113
6.11. Diagrama esquemático de la placa para el acelerómetro ADXL345	113
6.12. Placa de circuito impreso del Atmega48 vista anterior (der.) vista posterior (izq.)	114
6.13. Placa del ADXL345 vista anterior (der.) y vista posterior (izq.)	114
6.14. Fotografía del ITG-3200 (izq.) y ADXL-345 (der.) [82][83]	115
6.15. Fotografía del sistema de medición terminado	115
6.16. Conexión del programador con AVR (izq.) y Fotografía del programador (der.) [95].	116

6.17. Diagrama de flujo del programa interno del microcontrolador Atmeg48	117
6.18. Pantallas de dispositivos Bluetooth de Windows	118
6.19. Terminal USART mostrando la configuración del módulo Bluetooth	119
6.20. Terminal USART recibiendo los datos de los sensores inerciales	120
6.21. Pantalla de osciloscopio mostrando la duración de la $\Delta t = 4.3ms$	120
6.22. Medición de la longitud	121
6.23. Medición del ángulo de elevación para el plano	122
6.24. Experimento armado y listo para usar	122
6.25. Diagrama a bloques de elementos que conforman el software de aplicación	123
6.26. Vista organizacional del sistema informático	124
6.27. Esquema de una armadura humana hecha en Blender	126
6.28. Figura de un hueso en Blender y sus partes que lo conforman.	127
6.29. Modos de Visualización de la armadura en Blender.	129
6.30. Ventana de Blender mostrando el cuerpo del avatar y su armadura terminada . . .	130
6.31. Pantalla de Blender realizando el modelo 3D.	130
 7.1. Pantalla de simulación de la columna en Matlab	134
7.2. Pantalla de simulación del brazo derecho e izquierdo en Matlab	134
7.3. Prueba de distancia en la comunicación inalámbrica del sistema de medición . . .	135
7.4. Gráfica aceleración vs tiempo componente Ax,Ay y Az	136
7.5. Entrenador explicando los puntos de interés en la corrección	137
7.6. Entrenador evaluando la técnica del atleta cualitativamente	137
7.7. Atleta de remo ejecutando la actividad con el instrumento de medición montando en la muñeca izquierda.	138
7.8. Información del sensor capturada en la muñeca izquierda del atleta.	138
7.9. Diagrama de flujo del programa escrito en Matlab	139
7.10. Señales de velocidad angular separadas y filtradas	140
7.11. Modelo 3D de la ejecución de la técnica sobre remoergómetro.	141

Índice de cuadros

1.1. Clasificación de embarcaciones [2].	18
1.2. Programa básico de entrenamiento para remeros y la importancia de la técnica en su entrenamiento por Concept2 [11].	20
1.3. Estado del arte, empresas líderes y sus productos.	26
1.4. Estado del arte, empresas líderes y sus productos.	27
5.1. Algoritmo de DENAVIT-HARTENBERG	51
5.2. Técnica de remo [11].	70
5.3. Fallas 1 ^a y 2 ^a en la ejecución de la técnica [11].	71
5.4. Fallas 3 ^a y 4 ^a en la ejecución de la técnica [11].	72
5.5. Fallas 5 ^a , 6 ^a y 7 ^a en la ejecución de la técnica [11].	73
5.6. Falla 8 ^a , 9 ^a y 10 ^a en la ejecución de la técnica [11].	74
6.1. Desacople del robot general en A, B Y C	94
6.2. Tabla de Parámetros Denavit-Hartenberg para la columna (B)	95
6.3. Tabla de Parámetros Denavit-Hartenberg para brazo izquierdo Tabla 6.1 (C)	99
6.4. Tabla de Parámetros Denavit-Hartenberg para la brazo derecho Tabla 6.1 (A)	103
6.5. Análisis radiográfico del movimiento de la columna lumbar en adultos asintomáticos con escala en grados. [90]	106
6.6. Rango de movimiento de la cabeza	107
6.7. Rango del movimiento del hombro en adultos sanos, 3 GDL [90]	107

6.8. Rango normal del movimiento del codo. [90]	107
6.9. Rango de movimiento de la muñeca [90]	107
6.10. Configuración del sistema informático	125
6.11. Lista de huesos que forman la armadura del modelo 3D	128
7.1. Tabla de Parámetros Denavit-Hartenberg para el brazo izquierdo y derecho.	133
7.2. Tabla de Parámetros Denavit-Hartenberg de la columna	133

Agradecimientos

Al Todo Poderoso que nos permite escribir esta obra, a nuestras maravillosas familias por darnos el apoyo necesario, a nuestros amados padres que son los principales patrocinadores y al Instituto Politécnico Nacional.

Dr. Gabriel Sepulveda Cervantes (IPN-CIDETEC)

Por mostrarnos la viabilidad del proyecto así como el apoyo recibido en el CIDETEC, enseñando de forma teórico-práctica una metodología de liderazgo y trabajo en equipo en el desarrollo de proyectos tecnológicos, así como la adquisición de conocimiento de forma autodidacta.

Dr. José de Jesús Juárez Medel (IPN-CIC)

Por guiarnos adecuadamente en el trabajo terminal, enseñándonos técnicas de redacción y estilo en textos científicos, así como fomentarnos una visión objetiva como futuros profesionistas.

M. en C. Rafael Santiago Godoy (IPN-UPIITA)

Por su orientación y revisión en el trabajo terminal asesorándonos en los elementos requeridos para su entrega y la defensa del mismo.

Ing. Biónico Mauricio Rodríguez (IPN-UPIITA)

Por su asesoramiento en el proceso de validación del sistema de medición realizado en en el laboratorio de Física de la UPIITA

Lic. en Diseño industrial Magali de Jissel Guerrero López (ITESM)

Por su apoyo en el rediseño y recreación de las imágenes utilizadas.

Ing. Biomédico Azucena García Cruz (IPN-UPIBI)

Por su apoyo en la revisión y corrección del documento.

Los ingenieros Julio Alberto Mendoza Mendoza (IPN-UPIITA), Jorge Manuel Díaz Rentería (IPN-UPIITA), Juan Carlos Guerrero Carmona (IPN-ESCOM), Óscar Pérez Reyes (IPN-ESIME) y Edgard Said Batalla González (IPN-ESCOM).

Por su asesoramiento en el desarrollo de los modelos cinemático y 3D, así como en el uso de las herramientas Matlab, Blender y Panda3D.

Bonifacio Ortíz Olea

Entrenador y coordinador del club de remo UPIICSA por el apoyo en la realización de las pruebas técnicas a los atletas participantes dentro de las instalaciones.



Acerca de los autores



Hazur Sahib Socconini Alvarado, nació el 6 de Diciembre 1984 originario de México, D.F., practicó remo activamente durante su estancia en UPIITA, participó en el Campeonato Nacional de Remo 2007. Sus intereses son el desarrollo de las nuevas tecnologías, el esoterismo y la nutrición. Entre sus habilidades destaca el diseño y fabricación de tarjetas de circuito impreso, implementación de sistemas de instrumentación y adquisición de señales. Es egresado del CECyT-IPN #9 como Técnico en Sistemas Digitales.

Contacto: hazur_@hotmail.com



Jonatan Perea García, nació el 3 de Agosto de 1985 originario de México, D.F., Sus intereses son la computación, los video juegos, el desarrollo de tecnologías aplicadas a Internet y el football soccer. Entre sus habilidades destaca el manejo del lenguajes de programación como son C/C++, Python, manejo de linux, auditorías de redes inalámbricas. Es egresado del CECyT-IPN #8 como Técnico en Computación.

Contacto: fools_garden@hotmail.com

Resumen

En el presente escrito se propone un modelo de la actividad cinemática del atleta de remo bajo techo con el propósito de obtener una descripción del sistema biológico. Se define la técnica de remo y el ciclo de la remada en 4 etapas, además se describen 10 errores comunes y sus soluciones cualitativas. Se estudian las innovaciones y carencias de los productos mostrados en el estado del arte relacionados con el prototipo en desarrollo.

Buscando tener datos cuantitativos se construye un sistema de medición inercial, que es acoplado a un software de aplicación utilizándolo como retroalimentación para personas interesadas en el estudio y perfeccionamiento de los movimientos de remo. El software de aplicación consta de una interfaz gráfica la cual despliega un modelo 3D con el movimiento cinemático del atleta de remo bajo techo. Además una gráfica de tiempo de los datos del sistema de medición inercial. También escribe una base de datos de la última medición realizada.

De los errores comunes a solucionar, solo se eligió y se aplicó el sistema de descripción cinemática a la muñeca, obteniendo gráficas inerciales de su movimiento.

Palabras clave: *Análisis cinemático, Algoritmo de Denavit-Hartenberg, Remoergómetro, Remo bajo techo, Biomecánica, Deporte, Sensor inercial, Articulaciones Humanas, comunicación inalámbrica, cuantificación deportiva .*

Abstract

In the present work proposes a of rowing indoor cinematic athlete activity, obtaining a biological system description. In fact, we defined the rowing technique and its strokes cycle in 4 stages, and also describes 10 common mistakes and their qualitative solutions. The state of the art related to the prototype development is exposed.

Looking have quantitative data built an inertial unit of measurements, that docked to graphical interface used as feedback for people interested in the study and refinement of his stroke movements.

The common mistakes to solve only selected and applied to wrist kinematics system description, getting inertial graphic with respect its movements.

Key Words: *Cinematic analysis, Denavit-Hartenberg algorithm, rowing machine, rowing indoors, bio-engineering, sports, inertial sensor, human joints, graphical interface, wireless communication, sport quantification .*

Capítulo 1

Introducción

El **remo** se define como la disciplina deportiva que consiste en la propulsión de una embarcación con o sin timonel (persona que gobierna el timón del bote), mediante la fuerza muscular de uno o varios remeros, usando un remo largo o dos remos cortos como palancas simples de segundo grado [1], sentados de espaldas en la dirección del movimiento sobre la pista de remo, río o lago (ver Figura 1.1).



Figura 1.1: Atleta practicando remo, embarcación monoplaza de remos cortos

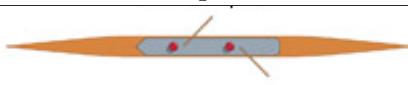
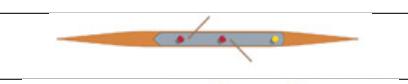
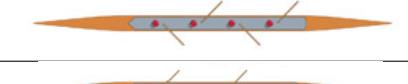
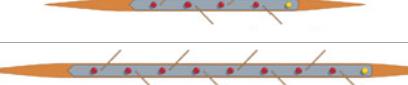
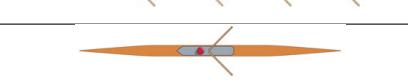
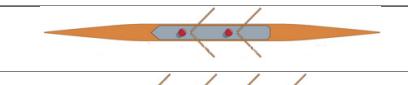
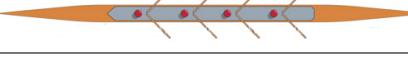
La historia del **remo** como deporte se desarrolló en Europa y, desde el siglo XIX, se tienen indicios de los primeros clubes constituidos fuera de Inglaterra principalmente en España y Portugal extendiéndose al continente Americano en Argentina[1]. Las primeras competencias registradas es "The Boat Race" realizada en el río Támesis por los equipos de las universidades de Cambridge y Oxford en 1829; [3] y la "Henley Royal Regatta" realizada en Henley-on-Thames en 1839; ambas competencias se desarrollaron en la ciudad de Londres Inglaterra [4].

La realización de carreras posteriores en Inglaterra y otras parte del mundo como Italia trajo como consecuencia que el 25 de junio de 1892 en la ciudad de Turín se constituyera la más antigua federación internacional de deportes en el movimiento olímpico, la **FISA** (*Fédération Internationale des Sociétés d'Aviron - Federación Internacional de Asociaciones de Remo*)[2], por representantes de Francia, Suiza, Bélgica e Italia.

La **FISA** es el consejo de administración del deporte de esta disciplina. Está facultado por 128 miembros de federaciones nacionales, comités olímpicos nacionales y el Comité Olímpico Internacional (**COI**). Actualmente este organismo establece las normas y reglamentos para la práctica del deporte, en todas sus formas (élite, paralímpicos, *indoor* o bajo techo y costeros), organizando y avalando eventos mundiales de remo. También ofrece asesoramiento para la organización de **regatas** (competencias de remo), educación técnica para entrenadores y otras cuestiones relacionadas con el deporte y su desarrollo [2].

Actualmente existen 8 clasificaciones para las embarcaciones propuesto por el organismo, de las cuales 5 son para remo largo, donde el remero utiliza el remo con ambas manos, y 3 para remo corto, donde el remero utiliza un remo en cada mano. Algunas clases consideran un timonel que va sentado en la popa (parte posterior del barco) de la embarcación (ver [Tabla 1.1](#)) [2].

Cuadro 1.1: Clasificación de embarcaciones [2].

Tipo de remo	Figura	Etiqueta	Descripción
largo		2-	2 sin timonel
largo		2+	2 con timonel
largo		4-	4 sin timonel
largo		4+	4 con timonel
largo		8+	8 con timonel
corto		1x	individual
corto		2x	doble
corto		4x	cuádruple

Para practicar el remo en las embarcaciones se requiere condiciones climatológicas específicas, características que se ven afectadas en la temporada invernal, por el cambio de las condiciones ambientales, en consecuencia se altera la realización de las pruebas y el proceso del entrenamiento. Para subsanar estos problemas se encontraron otras forma de seguir con la actividad, prueba de ello es que en el año de 1981 en Vermont USA, los remeros PETER AND DICK DREISSIGACKER (*fundadores de la empresa CONCEPT2*) deciden crear un dispositivo de entrenamiento para la temporada. PETER aseguró con clavos su vieja bicicleta al piso del granero y empezó a tirar sobre el extremo libre de la cadena, inventando con esto el remo indoor o remo bajo techo. Para finales de este año lanzan al mercado el *modelo A Indoor Rower* o **remoergómetro, producto del estudio metodológico de las condiciones físicas requeridas para el remo** (ver [Figura 1.2](#)) [5].



Figura 1.2: Máquina de remo o remo *Indoor* profesional CONCEPT2 D [7]

Fue tal su aceptación e interés **por parte de los remeros** que pasó de ser una máquina de simple entrenamiento para convertirse en la pieza fundamental de lo que actualmente se conoce como el deporte remo *indoor* o bajo techo. Prueba de ello es que en 1982 el club de remo **CRASH-B** localizado en Boston Massachusetts se interesó en organizar una competencia de remo bajo techo. Actualmente este evento es el *World Indoor Rowing Championship* (campeonato mundial de remo bajo techo)[6]. Hoy en día este deporte se realiza en el evento *Remos Indoor Concept2*. Anualmente se celebran 2 competencias internacionales *Concept2*, el *Open Europeo* en el mes de diciembre y el campeonato mundial en el mes de febrero en la ciudad de Boston [7].

La participación en estos eventos es abierto, se dividen en categorías relacionadas con edad, género y peso. El número de deportistas aumenta diariamente por lo que *Concept2* registra y publica un *ranking* internacional que supera a los 30,000 atletas en su sitio web oficial, en donde se publican las marcas olímpicas [10].

La organización formal para presentar el desafío es un acuerdo entrenador-deportista, sin embargo el fabricante de la máquina donde se realiza la disciplina, sugiere a los interesados en presentarse a estos eventos cubran 4 etapas básicas de entrenamiento: **Preparación, Pre-Competencia, Competición y Transición.**

En la etapa de **Preparación** se **acondiciona** físicamente al remero para adquirir fuerza física muscular y se **condiciona** la mentalidad del atleta; en la **Pre-Competición** se especializa el aprendizaje, se afianza la seguridad del atleta; la **Competición** aporta un aumento en la intensidad del entrenamiento, identificación de puntos débiles, creaciones de tácticas y estrategias; finalmente la **Transición** donde se hace la evaluación, se fijan objetivos para el próximo año (ver [Tabla 1.2](#)).

Cuadro 1.2: Programa básico de entrenamiento para remeros y la importancia de la técnica en su entrenamiento por Concept2 [11].

Periodos de Entrenamiento y Objetivos de un Programa de Entrenamiento de 12 Meses				
Preparación 27 semanas	Pre- Competición 9 semanas	Competición 12 semanas		Transición 4 semanas
Desarrollo de la capacidad física general, fuerza y fitness cardiovascular (CV). Desarrollo de una buena técnica. Mentalmente el atleta mejora la concentración para maximizar la mejora técnica y coger confianza para la competición venidera.	<p>El entrenamiento se hace más específico.</p> <p>El atleta continua trabajando en una buena técnica y preparación mental.</p>	<p>Aumenta la intensidad del entrenamiento que, si no se vigila, puede llevar a una pérdida de técnica. Identificar los puntos débiles y trabajar en ellos durante sesiones de baja intensidad. Éste es el momento para desarrollar tácticas y estrategias para la competición, así como para estabilizar el rendimiento de competición.</p>	<p>Periodo de disminución (los últimos 7-10 de Competición)</p> <p>La intensidad y duración del entrenamiento es reducida dramáticamente para permitir al cuerpo una total recuperación del intenso entrenamiento del Periodo de Competición.</p> <p>El atleta se centra en la estrategia de la regata y el calentamiento pre-regata, manteniendo las sesiones cortas. Esta es también una oportunidad de pulir la técnica.</p>	<p>¡Descanso!</p> <p>Éste es el momento para una completa relajación física y mental y puede incluir vacaciones. Debería mantenerse un mínimo nivel de actividad utilizando técnicas de entrenamiento complementario.</p> <p>Tiempo para la evaluación y para marcar objetivos para el próximo año.</p>
La flexibilidad del entrenamiento es un componente importante de todo periodo de entrenamiento				

Notas

- i. Aunque la tabla se lee de izquierda a derecha, para programar en periodos tu entrenamiento debes trabajar hacia atrás desde la fecha de tu competición más importante.
- ii. Periodo de transición: cuatro semanas después de la competición principal.

Las 3 primeras etapas propuestas por CONCEPT2 a los remeros comparten en común el desarrollo y afinación de la técnica de la remada, con lo que entrenadores y deportista consideran el corregir las deficiencias en la misma como la oportunidad de obtener resultados favorables.

En **México** esta disciplina se presenta con la expedición de un reglamento interno el día 22 de septiembre de 2007 para regular las competencias nacionales de remo bajo techo [8]. Un año después se organizó el primer torneo nacional de esta disciplina en la Ciudad de México, en el gimnasio II del Centro Deportivo Villa Olímpica, el día 21 de abril de 2008 [9].

En México el proceso clásico por elección destinado a la corrección de técnica está relacionado con un método cualitativo, el cuál usa la observación como evaluador de la técnica y el factor de corrección estará determinado por la experiencia del entrenador. La desventaja del proceso anterior es que la observación y experiencia varía entre personas y no se puede determinar un patrón para hacer un aprendizaje generalizado con el fin de sistematizar y detectar errores en la técnica.

La **investigación científica** aplicada al deporte proporciona una metodología teórico experimental con escalas y valores, para cuantificar los parámetros de interés como la velocidad, aceleración, frecuencia de remada y las trayectorias descritas por la ejecución de la técnica.

Los parámetros anteriormente mencionados de los **sistemas biológicos**, son estudiados con la **biomecánica deportiva** que es una sub-especialidad de la **biomecánica**, que se define de manera generalizada como la ciencia que estudia las relaciones entre el cuerpo humano y las leyes físicas [12].

La **biomecánica deportiva** aplicada al estudio de la técnica emplea las divisiones de la mecánica clásica: cinética, dinámica y cinemática.

La finalidad del presente trabajo terminal consiste en diseñar un sistema de análisis cinemático, construir un sistema de medición para que entrenadores y atletas de remo bajo techo cuenten con tecnología que auxilie en la evaluación de una sesión de entrenamiento y en línea (durante el proceso).

La construcción de este prototipo se enfocará a trabajar exclusivamente la técnica por segmento considerando sólo las extremidades superiores con la detección de errores y proporcionar elementos cuantitativos para el apoyo en la toma de decisiones al entrenador.

El enfoque de la biomecánica requerido para este proyecto esta directamente relacionado con la **definición de técnica actual de ÁLVAREZ** que establece el **estudio de una estructura rígida relativa a factores de espacio y tiempo sin importar sus causas**[51], por lo que el enfoque de estudio correspondiente es la cinemática.

El reporte final de trabajo terminal se encuentra dividido en 10 capítulos cuyo contenido es descrito de forma general a continuación.

Capítulo I Introducción: En este capítulo se expone brevemente la evolución histórica del remo como deporte; los factores que permitieron a partir de una máquina de simple entrenamiento fundar una nueva disciplina “el remo *indoor*”, las competencias internacionales que se realizan en la actividad *indoor*, el programa de entrenamiento aconsejado por el pionero en el deporte CONCEPT2 para los desafíos, el papel de la técnica en el entrenamiento propuesto, el sistema de corrección de técnica en México, los antecedentes sobre investigaciones científicas para el remo y remo indoor, una tabla de 10 empresas de diferentes países con sus respectivos productos dedicadas al estudio o captura de movimiento del cuerpo humano y finalmente para que se construye el dispositivo.

Capítulo II Objetivos: Se describe el resultado que se desea obtener, como se va resolver el problema planteado y las acciones que se van a realizar para alcanzar la meta trazada.

Capítulo III Planteamiento del problema: Se presenta el problema a resolver, haciendo una comparación con los productos del estado del arte señalando los puntos que marcan la diferencia entre estos y el prototipo a desarrollar .

Capítulo IV Justificación: Se muestra la tendencia del mercado en relación a las herramientas utilizadas en este proyecto con el fin de proporcionar métodos de investigación que a su vez sean información en la ayuda de toma de decisiones para entrenadores identificando la deficiencia de los mismos describiendo la problemática principal en su uso.

Capítulo V Marco Teórico: En el marco teórico se menciona la definición de técnica que sustenta el presente trabajo, la clasificación de la misma, la técnica específica de la remada, los 10 errores en la técnica de la remada. Los sensores iniciales que se usan, el microcontrolador y los programas computacionales requeridos para la construcción del sistema de medición inercial. Se proporcionan los elementos físicos, matemáticos y propios de la ingeniería que se utilizarán en el desarrollo del prototipo.

Capítulo VI Desarrollo: Se describe la metodología seguida en el proceso tanto en la parte de construcción del prototipo como en la parte de programación del software integrando todos los elementos para su presentación y funcionamiento global.

Capítulo VII Análisis e Interpretación de resultados: Se muestran los datos obtenidos del sistema construido describiendo los mismos para una fácil comprensión y señalando el significado que estos representan.

Capítulo VIII Conclusiones: Se comparan los objetivos planteados con los resultados obtenidos, describiendo los logros obtenidos de forma sistemática.

Capítulo IX Trabajos Futuros: Se detalla la siguiente etapa del proyecto para su posterior continuidad, extendiendo los alcances del mismo.

Capítulo X Referencias y Apéndices: Se presenta la bibliografía consultada así como los códigos de programación tanto del microcontrolador como de la computadora.

1.1. Antecedentes

En la década de los 40's del siglo pasado Alemania del Este se convierte en referente de la investigación con el **estudio fisiológico del remero**, sin embargo 5 años después por conflictos diplomáticos relacionados con la **Guerra Fría** existe una barrera con América generando un crecimiento lento en las investigaciones de esta disciplina.

En ese año SZAL y COLS. compararon 2 test llevados a cabo por remeros, el primero realizado en un remoergómetro y el segundo en un **cloergómetro**; es un instrumento específico calibrado para la medición de la capacidad de trabajo similar a una bicicleta sobre la que se pedalea. En el primer test se obtuvieron valores altos en la frecuencia respiratoria [13].

Finalmente un año después de la caída del muro de Berlín, en 1990 la ciudad de Ulm, Alemania se convierte en sede para el primer intercambio de datos científicos de la disciplina. Tres años después en 1993 BELL y COLS realizaron un estudio donde encontraron ganancias de fuerzas para un entrenamiento de 10 semanas de duración con 3 sesiones en cada una de ellas [14].

En 1996 GONZÁLEZ con su investigación analiza tres protocolos de lactatos distintos en el remoergómetro, encontrando diferencias en las cinéticas del lactato entre los distintos protocolos aplicados y en cada remero [16].

En 2002 R. DAVOODI con su investigación, consiguió optimizar el tratamiento de rehabilitación en parapléjicos (es una enfermedad por la cual la parte inferior del cuerpo queda paralizada y carece de funcionalidad) automatizando la aplicación de la electroestimulación en cada fase de la remada sobre el remoergómetro [17].

Seis años después en 2008 en el remo tradicional JEFFREY CORNETT , PAMELA BUSH , NANCY CUMMINGS describen un modelo de 8 factores para evaluar el rendimiento de una tripulación durante la carrera, dividido en 4 categorías principales[18]:

1. **Capacidad humana:** *Talento Humano (H), Biomecánica (B),*
2. **Escenario de la carrera:** *Fisiología (P) y Agua con Medio Ambiente (W)*
3. **Rendimiento en la ejecución:** *Calidad en la Ejecución (Q) y Carrera Psicológica (R)*
4. **Decisiones:** *Estrategia (S) y Táctica (T)*

Descritas por la siguiente ecuación:

$$Time = f_{1-n}(H + B + P + W + Q + R + S + T) \quad (1.1)$$

En este mismo año MAYORGA VEGA y MERINO MARBAN realizan un estudio cualitativo de los errores frecuentes en remo obteniendo como resultados errores encontrados durante la ejecución

del ejercicio de remo que indica la mala higiene postural y ergonomía de los sujetos usuarios de las máquinas de musculación [19].

La ergonomía es la disciplina científica relacionada con la comprensión de las interacciones entre humanos y otros elementos de un sistema, se preocupa de las características anatómicas, antropométricas, fisiológicas y biomecánicas humanas en tanto que se relacionan con la actividad física a fin de optimizar el bienestar humano y el rendimiento global del sistema. [35].

Y finalmente en el 2009 en el mes de Agosto ANTE PANJKOTA y TAMARA SUPUK propusieron un método para mejorar la evaluación de la técnica de remo bajo techo con la captura de la información por medio de fotogrametría (técnica cuyo objetivo es el conocimiento de las dimensiones y posición de objetos en el espacio, a través de la medida o medidas realizadas sobre 2 o más fotografías) con el fin de hacer una valoración fuera de línea después de cuantificar los datos obtenidos y con el esquema de un cuadro de lógica difusa conformado de los atletas [20].

Dos meses después en Septiembre se construye un sensor específico de fuerza usando la deformación que se presenta en el *grip* o empuñadura para obtener la variación en cada movimiento de la pala en cada ciclo de la remada [21].

1.2. Estado del arte

Las investigaciones anteriores han traído en consecuencia un desarrollo tecnológico, materializado en productos industriales como sistemas de captura de movimiento, sistema de navegación, sistema de capturas de vídeo y procesamiento en software.

En este trabajo los productos se clasificarán considerando el tipo de tarea que realizan (captura de movimiento, representación de un trabajo o remada) y en la manera de medir los datos directa (sobre el atleta) o indirectamente (medidas en la maquina y/o instrumento de la actividad).

En la [Tabla 1.3](#) se presentan 10 empresas líderes en su ramo con sus respectivos productos y una breve descripción resumida en los siguientes campos: nombre del producto, nombre de la empresa, país de origen, años de lanzamiento, sitio web oficial, sistema operativo, tipo de tecnología (obtención de datos) y los elementos con que viene incluido (*hardware* y/o *software*), tipo de sensor para la adquisición de la señal, masa en kilogramos del producto, tipo de comunicación inalámbrica, interfaz *PC*, alcance del producto en metros, autonomía (duración de la fuente de energía) y precio del producto en el mercado.

1. MVN Biomech

Sistema inercial de captura de movimientos humanos. MVN captura de movimiento humano, sin las limitaciones impuestas por el uso de cámaras o emisores. Este sistema portátil está basado en el sensor inercial (IMU), provee de señales de orientación en 3D sin deriva, así como datos cinemáticas: aceleración 3D, giros en 3D y posicionado respecto al campo magnético terrestre en 3D. Es excelente para la medición de la orientación de segmentos del cuerpo humano. Utilizado en animación (cine, jugos virtuales), entrenamiento, simulación, investigación y desarrollo biomecánico.

2. Gypsy-6

Es un traje electromecánico de captura de movimiento. Cuenta con una estructura metálica o exoesqueleto, mide los ángulos de los segmentos, por medio de potenciómetros, además cuenta con giroscopios para medir velocidad angular. La información la transmite vía inalámbrica. A pesar de su diseño externo permite completa libertad de movimiento al usuario.

3. Visualeyez VZ4000v

Es un sistema de captura de movimiento 3D basado en vision artificial, cubre un radio de 7 metros, 3 cámaras reconocen hasta 512 marcas activas en tiempo real puestas en un solo sujeto o múltiples sujetos. Las cámaras cuentan con un circuito de auto calibración.

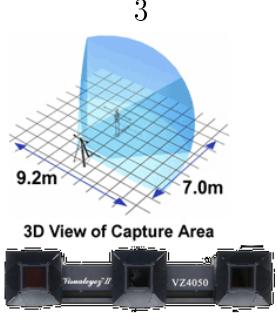
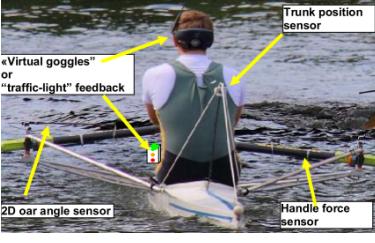
4. CyberGlove II

Es un sistema que captura el movimiento de la mano, compuesto por 22 sensores distribuidos en todo el guante, la información la transmite en tiempo real vía inalámbrica dando al operador completa libertad de movimiento.

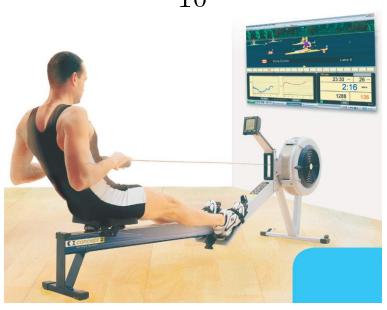
5. BioRow

Este sistema utiliza un sistema de vídeo de circuito cerrado para la monitorización del ciclo de la remada, mostrando la información en un visor que porta el remero así como la transmisión de señales de los sensores ubicados en el punto de apoyo de la pala. Tiene la posibilidad de transmitir desde una estación donde el entrenador puede comunicarse con el atleta con una vía de audio para darle indicaciones que mejoran su técnica.

Cuadro 1.3: Estado del arte, empresas líderes y sus productos.

 <p>1</p>	Nombre: MVN Biomech Empresa: Xsens Technologies B.V. País origen: Enschede Año: 2005-2009 Web: [22] OS.: Windows XP, Vista Tecnología: Hardware y Software	Sensor: 17x IMU 6 DOF Peso [Kg.]: NA Inalámbrico: Bluetooth Interface PC: USB Alcance [m]: <150 [m] Autonomía: 3 Hrs. 8xAA NiMH Precio: \$10,000 dlls
 <p>2</p>	Nombre: Gypsy-6 Empresa: Animazoo UK Ltd País origen: Reino Unido Año: 2010 Web: [23] OS.: Windows XP, Vista Tecnología: Hardware y Software	Sensor: 37x pots. 2x gyros. Peso [Kg.]: 6 Inalámbrico: SI Interface PC: SERIAL Alcance [m]: <200 Autonomía: >4 Hrs. NiMH Precio: \$25,000 dlls
 <p>3</p>	Nombre: Visualeyez VZ4000v Empresa: Phoenix Technologies País origen: Canadá Año: 2006 Web: [24] OS.: Windows XP, Vista Tecnología: Hardware y Software	Sensor: Led markers Peso [kg]: 2.2 Inalámbrico: Si, S. Óptico Interface PC: Serial RS-232 Alcance [m]: <7 Autonomía: <7 Precio: NA
 <p>4</p>	Nombre: CyberGlove II Empresa: Cyberlove Systems País origen: Enschede Año: 2005-2009 Web: [27] OS.: Windows XP, Vista Tecnología: Hardware y Software	Sensor: 17x IMU 6 DOF Peso [kg]: NA Inalámbrico: Bluetooth Interface PC: USB Alcance [m]: <150 [m] Autonomía: 3 Horas 8xAA NiMH Precio: \$10,000 dlls
 <p>5</p>	Nombre: BioRow (video) Empresa: BioRow Ltd. País origen: Australia Año: 2005 Web: [25] OS.: Windows XP, Vista Tecnología: Hardware y Software	Sensor: NA Peso [kg]: 0.5 Inalámbrico: Si, RF-Fm. Interface PC: NA Alcance [m]: >100 Autonomía: <4 Hrs. Li-Ion Precio: £ 1.595

Cuadro 1.4: Estado del arte, empresas líderes y sus productos.

 6	Nombre: AmmSensor Empresa: AMM Technologies LLC País origen: USA Año: 2009 - 2010 Web: [26] OS.: Windows XP, Vista Tecnología: Hardware y Software	Sensor: 1x IMU 9 DOF Peso [Kg.]: 42gms Inalámbrico: Bluetooth Interface PC: USB Alcance [m]: <150 [m] Autonomía: <6 Hrs. Precio: \$1,200 dlls
 7	Nombre: InertiaCube BT Empresa: InterSense Inc. País origen: USA Año: 2010 Web: [28] OS.: Windows, Linux, Mac Os X Tecnología: Hardware y Software	Sensor: 1x IMU 3 DOF Peso [Kg.]: 0.067 Inalámbrico: Bluetooth Interface PC: RS-232 Serial Alcance [m]: 33 Autonomía: <10 Hrs. Precio: \$3,000 dlls
 8	Nombre: PlayStation Move Empresa: Sony Computer Entertainment País origen: JAPON-USA Año: 2010 Web: [29] OS.: Windows XP, Vista Tecnología: Hardware y Software	Sensor: 1x IMU 6 DOF Peso [kg]: 2.2 Inalámbrico: Bluetooth Interface PC: - Alcance [m]: <7 Autonomía: NA Precio: NA
 9	Nombre: Gama Umana C. Empresa: Umana Innova S.L. País origen: Portugal Año: 2006 Web: [30] OS.: Windows XP, Vista Tecnología: Hardware y Software	Sensor: IMU Peso [kg]: <3 Inalámbrico: GPS Interface PC: USB Alcance [m]: NA Autonomía: >2 Hrs. Precio: NA
 10	Nombre: Row Pro Empresa: Digital Rowing Inc. País origen: USA Año: 2009 Web: [31] OS.: Windows XP, Vista Tecnología: Hardware y Software	Sensor: Encoder Concept2 Peso [kg]: NA Inalámbrico: NA Interface PC: USB Alcance [m]: NA Autonomía: NA Precio: \$30 dlls

6. AmmSensor

Es un sistema inalámbrico vía Bluetooth compuesto por una unidad de medida inercial de 9 grados de libertad, tiene incluido un acelerómetro, un giróscopo y un magnetómetro. Su tamaño es reducido, cabe en la palma de la mano, la medida la realiza en tiempo real. Cuenta con un *kit* de desarrollo de *software* para el procesamiento de las variables medidas.

7. InertiaCube BT

Entrega datos de orientación en 3D en tiempo real utilizando un sistema de comunicación Bluetooth como interfaz a la computadora. Cuenta con una batería recargable. Diseñado para análisis de movimiento en humanos.

8. PlayStation Move

Es un dispositivo de usuario para la consola PlayStation® 3, basado en reconocimiento visual por medio de una cámara y un control que tienen sensores iniciales. La cámara identifica la posición tridimensional del dispositivo y los sensores iniciales registran velocidad y aceleración angulares. Cuenta con comunicación inalámbrica permitiendo al usuario una completa libertad de movimiento.

9. Gama Umana C

Sistema de adquisición de datos para el análisis dinámico y biomecánico de remo, concebida para la optimización de los resultados deportivos. Mide los parámetros biomecánicos (velocidad, aceleración, torques), procesa y monitoriza utilizando un software de análisis, para visualizar el rendimiento de los deportistas.

10. Row Pro

Es un software de aplicación diseño como auxiliar en el entrenamiento, motivación de la técnica y seguimiento del atleta. El programa permite llevar una estadística de los entrenamientos permitiendo mejorar la toma de decisiones por parte del entrenador. Este software requiere conectar la maquina de remo *Concept2* a la computadora para que pueda administrar la información proporcionada por el sensor de esta.

Capítulo 2

Objetivos

2.1. Objetivo General

- Realizar un análisis cuantitativo de la cinemática del remo bajo techo a través de sensores iniciales a favor de la técnica, presentando un modelo biomecánico con la finalidad de extraer, procesar y desplegar información útil.

2.2. Objetivos Particulares

- Desarrollar el modelo biomecánico para describir la cinemática del remo bajo techo.
- Desarrollar un sistema electrónico que registre la actividad cinemática.
- Caracterizar los sensores empleados.
- Utilizar un sistema de comunicación inalámbrico como interfaz.
- Implementar una interfaz gráfica para visualización cinemática.

Capítulo 3

Planteamiento del problema técnico

El remo requiere la ejecución de movimientos específicos y repetitivos conocidos como técnica deportiva. En **México** el proceso de corrección de técnica está relacionado con un método cualitativo, el entrenador utiliza la observación como evaluador de la misma registrando de forma manual sus percepciones y el factor de corrección estará determinado por la experiencia del entrenador. La desventaja del proceso anterior es que la observación y experiencia es variable entre personas y no se puede determinar un patrón para hacer un aprendizaje normalizado con el fin de sistematizar y detectar errores en la técnica. Por este motivo **el principal problema a resolver es la cuantificación de datos útiles correspondientes a la ejecución en la técnica**, considerando que dicha medición se realice con la menor perturbación posible en la ejecución de la misma.

Capítulo 4

Justificación

La investigación científica aplicada al deporte proporciona una metodología teórico experimental con escalas y valores, para cuantificar los parámetros de interés descritos por la ejecución de la técnica. Este trabajo inicia su desarrollo al identificar las necesidades de los entrenadores y atletas de remo del mejoramiento y corrección de la técnica, satisfaciendo con una herramienta de medición cuantitativa de la cinemática, aportando información que en conjunto con la proporcionada por el método tradicional mexicano, permite a los interesados contar con parámetros suficientes para generar criterios, con los que se establezcan acciones y estrategias con el fin de construir un plan de preparación en favor de la técnica, auxiliando la labor del entrenador, haciendo énfasis que dicho sistema no existe en México.

El sistema planteado busca la utilización de nuevas tecnologías basadas en sensores inerciales, aportando otra alternativa de estudio correspondiente a la cinemática respecto a las ya existentes como la visión artificial y video-grabación, además estas últimas presentan los problemas típicos de **iluminación, oclusión** (obstrucción visual que presentan los cuerpos opacos) y **paralaje** (desviación angular de la posición aparente de un objeto, dependiendo del punto de vista elegido) los cuales no se manifiestan con la utilización de MEMS. Las etapas planteadas para el sistema de medición son: adquirir la señal usando sensores inerciales IMU'S (acelerómetro y giróscopo), después acoplar la señal de los sensores al microcontrolador Atmega 48, posteriormente transmitir la señal por comunicación inalámbrica evitando afectar la realización del deporte, finalmente procesar y graficar la señal capturada de los sensores inerciales.

El proceso en la cuantificación de la información se estudiará usando la cinemática y el algoritmo “**Denavit-Hartenberg**”, herramienta matemática que facilita la obtención de un modelo representativo del movimiento del atleta, permitiendo estudiar el fenómeno fuera de su entorno natural.

Capítulo 5

Marco Teórico

En el deporte intervienen factores importantes para determinar la correcta ejecución de un movimiento. Conocer qué tipo de sustancias secretan los músculos en movimiento y las cantidades necesarias para lograrlo, así como diversos aspectos del funcionamiento del cuerpo humano y sus reacciones ante los impulsos del cerebro, requiere de una ciencia que recopile e interprete esta información, la encargada de esta tarea es la Biología. “Pero si a los conocimientos biológicos se añaden la metodología y los principios de la física, podemos realizar un estudio con detalle de la situación [33].

El movimiento que realiza el atleta de remo bajo techo (sistema biológico) para desempeñarse en la disciplina es el fenómeno físico a estudiar. [37]. Antes de explicar el fenómeno anterior es necesario definir los siguientes conceptos con el fin de comprender dicho propósito.

El movimiento es un fenómeno físico que se define como todo cambio de posición que experimentan los cuerpos de un sistema, o conjunto, en el espacio con respecto a ellos mismos o con arreglo a otro cuerpo que sirve de referencia.

La mecánica es la rama de la física que describe el movimiento de los cuerpos, y su evolución en el tiempo, bajo la acción de fuerzas. El estudio del movimiento de los cuerpos macroscópicos le corresponde a la mecánica Newtoniana, que se llama también mecánica clásica, aunque a veces esta última denominación se usa para referirse a formulaciones alternas, matemáticamente complejas [37].

Para estudiar el movimiento de los cuerpos se han desarrollado en la mecánica modelos físicomatemáticos abstractos como el de partícula o punto materia, punto geométrico dotado de masa, que ha surgido como idealización de un cuerpo cuyas dimensiones son pequeñas comparadas con sus desplazamientos o bien cuya estructura y movimientos internos no son relevantes para un cierto estudio [37].

Otros modelos esenciales de la mecánica son los sistemas de partículas y los cuerpos continuos, que pueden ser cuerpos rígidos o deformables [37].

Por otro lado, la mecánica clásica se auxilia en tres sub-disciplinas como son la **Cinemática**, **Estática** y **Dinámica**. La **Cinemática** es la descripción matemática del movimiento sin atender a las causas que lo producen. En la **Estática** se estudian los cuerpos en equilibrio. En la **Dinámica** se estudia la relación existente entre el movimiento de un cuerpo y las interacciones de ese cuerpo con los demás que lo rodean [37].

Los postulados básicos de la mecánica son las Leyes de NEWTON del movimiento, cuya idea central es: las interacciones se representan mediante las fuerzas hechas sobre un cuerpo, cuya resultante está directamente vinculada con una propiedad esencial de dicho cuerpo, su masa inercial, y con la aceleración de su movimiento [37].

5.1. Mecánica y descripción de los movimientos en el cuerpo biológico

5.1.1. Magnitudes escalares y vectoriales

En la física y de manera particular en la mecánica para describir el fenómeno se requiere de poder realizar una cuantificación de lo que esta sucediendo, se reconocen dos elementos básicos para la cuantificación la **magnitud escalar** y la **magnitud vectorial** [37].

La **magnitud escalar** es aquella cuya determinación solo requiere el conocimiento de un número real y de una unidad de medida. El número indica la cantidad de veces que la magnitud medida contiene a la unidad considerada. Ejemplos típicos de magnitudes escalares son: la longitud, la masa, el tiempo, el trabajo, la energía [37].

La **magnitud vectorial** es una magnitud para cuya determinación se requiere además del conocimiento de la magnitud escalar, su dirección y su sentido. Ejemplos de magnitudes vectoriales son: la velocidad, la aceleración, la fuerza, la cantidad de movimiento [37].

5.1.1.1. Sistema internacional de unidades y dimensión

En principio, cada magnitud o cantidad física podría tener sus propias unidades, independientes de las demás. Por ejemplo, si en un movimiento rectilíneo definimos la velocidad como el cociente del desplazamiento Δx sobre el intervalo de tiempo Δt , y la longitud, el tiempo y la velocidad tienen unidades completamente independientes entre sí, la velocidad se expresaría como [37],

$$v = C \frac{\Delta x}{\Delta t} \quad (5.1)$$

en donde C es un coeficiente numérico que permite realizar la conversión de unidades. de esta manera, en las ecuaciones de la Física habría coeficientes numéricos que las complicarían inútilmente.

Para evitar esto, las magnitudes físicas y sus unidades de medida, se organizan en sistemas de unidades [37].

En un sistema de unidades se adoptan por convención magnitudes físicas como magnitudes fundamentales, cuyas unidades de medida son arbitrarias e independientes unas de otras [37].

En la Mecánica, los sistemas de unidades utilizan como magnitudes fundamentales la longitud, la masa y el tiempo. Las otras cantidades físicas se llaman magnitudes derivadas y sus unidades de medida se establecen en términos de las fundamentales, fijando los valores numéricos de los coeficientes en las expresiones matemáticas que definen dichas magnitudes derivadas. Por ejemplo, en el caso de la velocidad, $C = 1$, y así [37].

$$v = \frac{\Delta x}{\Delta t} \quad (5.2)$$

La unidad de velocidad ya no es independiente. La unidad de velocidad es la velocidad de un cuerpo que recorre una unidad de longitud en una unidad de tiempo, o, se expresa de la siguiente forma, la unidad de velocidad es la unidad de longitud dividida por la unidad de tiempo. Aquí es donde aparece el concepto de **dimensión** de una magnitud física [37].

Las magnitudes fundamentales mediante un símbolo: L para la longitud, M para la masa, T para el tiempo. Se dice que la velocidad tiene dimensiones (o dimensión) de longitud sobre tiempo, lo que se escribe mediante la llamada ecuación de dimensiones [37].

$$[v] = \frac{L}{T} = LT^{-1} \quad (5.3)$$

El sistema de unidades más importante es el Sistema Internacional de Unidades, abreviado SI, y establecido por convenios internacionales. En lo que concierne a la mecánica, las magnitudes fundamentales son: longitud (L), masa (M) y tiempo (T). Sus unidades correspondientes son: el metro (m), el kilogramo (kg) y el segundo (s), cuyas definiciones han cambiado en varias ocasiones, reflejando el refinamiento tecnológico [37].

5.1.2. Vectores

La mayoría de los conceptos en mecánica son escalares o vectoriales. Una cantidad escalar es sólo una magnitud. Conceptos como masa, energía, potencia, trabajo mecánico y temperatura son cantidades escalares. Una cantidad vectorial, por el contrario, tiene una magnitud y una dirección asociada a ésta. Fuerza, momento, velocidad y aceleración son ejemplos de cantidades vectoriales. La magnitud de un vector es también una cantidad escalar. La magnitud de cualquier cantidad (escalar o vector) es siempre un número positivo correspondiente a la medida numérica de esa cantidad [38].

Gráficamente, un vector se representa como segmentos de recta dirigidos o flechas en planos o \mathbb{R}^3 ; es decir, bidimensional o tridimensional. La orientación de la flecha indica la línea de acción y la punta de la flecha denota la dirección y el sentido del vector. Si más de un vector debe ser mostrado en un único cuadro, la longitud de cada flecha debe ser proporcional a la magnitud del vector que representa.

5.1.2.1. Concepto de vector fijo, ligado o localizado

Sea el espacio tridimensional euclíadiano, es decir el espacio en el que acontecen los fenómenos físicos “E” generando el conjunto de producto cartesiano (ExE) , que estará formado por pares de puntos ordenados de este espacio, y constituido en un nuevo conjunto que se denomina $(ExE)^*$, el cual es igual al conjunto anterior, pero en el que se han suprimido los elementos diagonales, estando por tanto este conjunto formado por pares ordenados de puntos distintos del espacio. Este conjunto podrá ser expresado como:

$$(ExE)^* = \{(ExE) - (x, x)\}; \forall x \in E \quad (5.4)$$

Cada elemento de este conjunto es un segmento orientado siendo $\overrightarrow{AB} \neq \overrightarrow{BA}$ ya que en el producto cartesiano el elemento \overrightarrow{AB} es distinto del elemento \overrightarrow{BA} .

El vector ligado se define como el conjunto ordenado de los elementos del conjunto $(ExE)^*$, añadiendo además el vector nulo $\vec{0}$, es decir:

$$\left\{ (ExE)^*, \vec{0} \right\} \quad (5.5)$$

Las características que define a un elemento de este conjunto, es decir a un vector fijo son las siguientes:

- Modulo $\|\vec{AB}\|$: Es un real positivo asociado a la recta \overleftrightarrow{AB} y define la longitud del segmento que une los puntos A Y B
- Dirección: Es la de la recta sobre la cual se encuentra el segmento \overrightarrow{AB}
- Sentido: Es la ordenación de punto A y B.
- Localización: Es el primero de los puntos que constituyen el par ordenado.

5.1.2.2. Vector libre

El conjunto de vectores fijos se divide o clasifica en una clase de equivalencias que surgen a partir del hecho de comprobar cumple las propiedades reflexiva, simétrica y transitiva de forma natural, por su constitución donde dos vectores fijos son equipolentes entre sí, cuando ambos tienen igual módulo, dirección y sentido. La relación equipolente introducida para representar este vector libre se expresa como L por lo tanto

$$(ExE)^*/L, \overrightarrow{0} \quad (5.6)$$

un ejemplo de magnitud física representada por un vector libre es el “par”, el cual puede ser localizado en cualquier punto del espacio.

5.1.2.3. Vector deslizante

La relación a introducir para los vectores deslizantes es la relación D equivalente enunciada de la siguiente manera:

Dos vectores fijos están relacionados si son colineales, tienen igual módulo y el mismo sentido.

El conjunto de las clases en que se divide el conjunto de los vectores fijos al introducir esta relación, es el conjunto de los vectores deslizantes, el cual podrá ser expresado así:

$$(ExE)^*/D, \overrightarrow{0} \quad (5.7)$$

Ejemplo de vectores deslizantes son las fuerzas que actúan sobre sólidos indeformables.

5.1.2.4. Operaciones básicas con vectores.

Las operaciones básicas de los vectores son: suma y producto por un escalar

5.1.2.5. Producto de un vector por un escalar

Es una operación definida tanto para vectores libres, como ligados, como deslizantes. Consiste en asociar a un vector \vec{a} y a un escalar λ , un nuevo vector (del tipo del de \vec{a} , es decir, libre, ligado o deslizante) de modo que:

$$|\lambda \bullet \vec{a}| = |\lambda| \bullet |\vec{a}| \quad (5.8)$$

donde:

$|\lambda| = \text{valor absoluto } \lambda$

$|\vec{a}| = \text{modulo del vector } \vec{a}$

La dirección y sentido de $\lambda \bullet \vec{a}$ es igual a la dirección y sentido de \vec{a} en el caso de que $\lambda > 0$ y de sentido contrario $\lambda < 0$.

5.1.2.6. Suma de vectores

Es una operación definida para:

- Vectores Libres
- Vectores deslizantes, caso de que sus rectas de acción se corten en un punto
- Vectores fijos, caso de que sus puntos de aplicación coincidan

La suma es una ley de composición interna, que a dos vectores dados asocia un tercer vector, que viene dado por la composición geométrica denominada ley del paralelogramo (ver [Figura 5.2](#)):

$$\vec{s} = \vec{a} + \vec{b} \quad (5.9)$$

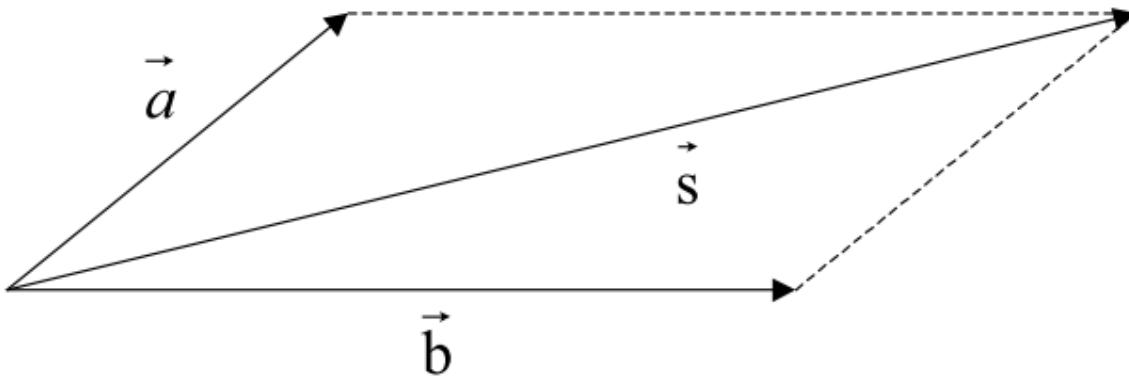


Figura 5.1: Suma geométrica de 2 vectores

Cuando se trata de la suma de más de dos vectores se procederá sumando los dos primeros, y a continuación sumando su resultado con el tercero y así sucesivamente, o bien, afectando la composición geométrica siguiente (ver [Figura 5.2](#)), denominada polígono de vectores:

$$\vec{s} = \vec{a} + \vec{b} + \vec{c} \quad (5.10)$$

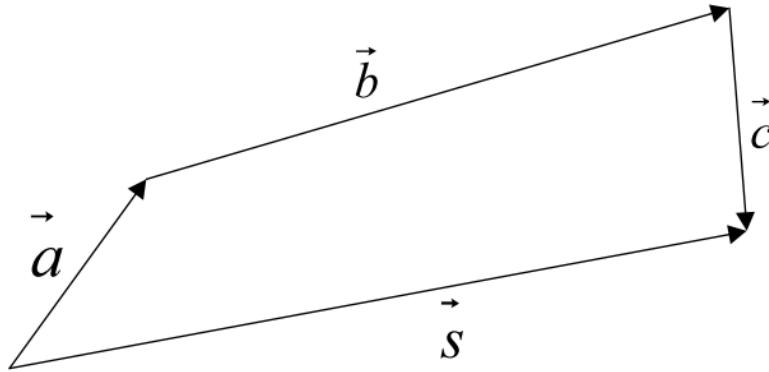


Figura 5.2: Suma geométrica de más de dos vectores

Con respecto a esta operación suma el conjunto de los vectores tiene estructura de grupo abeliano o commutativo, ya que se cumplen las siguientes propiedades:

1. Es una ley de composición interna
2. Commutativa
3. Asociativa
4. Existencia del elemento neutro, $\vec{0}$
5. Existencia del elemento simétrico $\vec{a} + \vec{a}' = 0$

5.1.3. Concepto de espacio vectorial

Se dice que un determinado conjunto tiene estructura de espacio vectorial, cuando habiéndose definido en el mismo 2 operaciones o leyes de composición, una interna: la suma, y otra externa: el producto por los elementos de un cuerpo (K) de escalares, éstas cumplen las siguientes propiedades:

Suma

1. Commutativa: $\vec{a} + \vec{b} = \vec{b} + \vec{a}$
2. Asociativa: $\vec{a} + (\vec{b} + \vec{c}) = (\vec{a} + \vec{b}) + \vec{c}$
3. Existencia del elemento neutro $\vec{a} + \vec{0} = \vec{0} + \vec{a} = \vec{a}$
4. Existencia de elementos simétricos $\vec{a} + (-\vec{a}) = (-\vec{a}) + \vec{a} = \vec{0} \quad \forall \vec{a} \in V$

Producto

1. Distributiva respecto a la suma de escalares: $(\lambda + \mu)\vec{a} = \lambda\vec{a} + \mu\vec{a}$
2. Distributiva respecto a la suma de vectores: $\lambda(\vec{a} + \vec{b}) = \lambda\vec{a} + \mu\vec{b}$
3. Asociativa respecto al producto de escalares: $\lambda(\mu\vec{a}) = \lambda\mu\vec{a}$
4. Existencia del elemento neutro: $1 \bullet \vec{a} = \vec{a}$

5.1.4. Cuaternión

Un cuaternión es una forma alternativa de representar rotaciones a través del cualquier eje. Matemáticamente, son una extensión del conjunto de números complejos. Presentan ventajas comparado con las rotaciones por matrices. Concatenar cuaterniones exige menos operaciones y requieren menos espacio en memoria para almacenarlos que una matriz. El espacio vectorial de cuaterniones fueron desarrollados por WILLIAM ROWAN HAMILTON en 1843 [39]. Estos números representan el espacio de 4 dimensiones y están compuestos por: una parte real y tres partes imaginarias [40]. Los cuaterniones es un subconjunto de los números **hipercomplejos** (suma de un numero real y 3 números imaginarios) que se escriben de dos formas:

1. Forma vectorial

$$q = w, x, y, z = w + xi + yj + zk \quad (5.11)$$

1. Forma Matricial

$$\begin{bmatrix} a + bi & c + di \\ -c + di & a - bi \end{bmatrix} \quad \text{o bien} \quad \begin{bmatrix} a & -b & d & -c \\ b & a & -c & -d \\ -d & c & a & -b \\ c & d & b & a \end{bmatrix} \quad (5.12)$$

5.1.4.1. Descripción de los cuaterniones

Sea el sistema que se encuentra en \mathbb{C}^4

$$q = a_0 + a_1\bar{i} + a_2\bar{j} + a_3\bar{k} \quad \exists q \in \mathbb{C}^4, \{a_i : i \in Z_+\} \subseteq \mathbb{R}, \bar{i}, \bar{j}, \bar{k} \in Im^3 \quad (5.13)$$

Que cumple con las siguientes propiedades:

$$\exists! q_0 \in \mathbb{C}^4, ssi \{a_i : i \in \mathbb{Z}_+\} \subseteq [0] \quad (5.14)$$

$$\forall q_j \exists! q_j^* \ni q_j + q_j^* = 2a_0 \in \mathbb{R}, (q_j, q_j^*) = a_0^2 - a_1^2 - a_2^2 - a_3^2 \in \mathbb{R}, \quad (5.15)$$

$$\forall q_j \exists! q_j^- \ni q_j + q_j^- = 0, (q_j, q_j^-) = a_0^2 - a_1^2 - a_2^2 - a_3^2 \in \mathbb{R}, \quad (5.16)$$

$$\forall q_j \in \mathbb{C}^4, \exists! \mu_{L_2} := \|q_j\| \in \mathbb{R}_+, \|q_j\| := (a_0^2 - a_1^2 - a_2^2 - a_3^2)^{\frac{1}{2}} \quad (5.17)$$

$$\exists! \mu_{L_2}(q_j) = 1 \quad (5.18)$$

Normalización de un cuaternión

$$\exists q_{N_j} := \frac{q_j}{\|q_j\|} \in \mathbb{C}^4 \quad (5.19)$$

Inverso de un cuaternión

$$\exists q_{N_j}^{-1} := \frac{q_j^{-1}}{\|q_j\|} \in \mathbb{C}^4 \quad (5.20)$$

5.1.4.2. Generación del campo para cuaterniones

Para la generación de los cuaterniones se define dos operadores básicos y sus propiedades: suma, y producto cruz:

- **Suma** ($\mathbb{C}^4, +$)

Asociativa:

$$\forall q_{j1}, q_{j2}, q_{j3} \in C^4 \exists ((q_{j1} + q_{j2}) + q_{j3} = q_{j1} + (q_{j2} + q_{j3})) \in \mathbb{C}^4 \quad (5.21)$$

Elemento Neutro:

$$\begin{aligned} \forall q_{ji} \in \mathbb{C}^4 \exists! q_n \ni q_{ji} + q_n &= q_{ji}, \text{ ssi} \\ q_n &= [0] \in \mathbb{C}^4 \end{aligned} \quad (5.22)$$

Inverso:

$$\forall q_{ji} \exists \bar{q}_{ji} \in \mathbb{C}^4 \ni q_{ji} + \bar{q}_{ji} = q_n \in \mathbb{C}^4 \quad (5.23)$$

Commutatividad:

$$\forall q_{j1}, q_{j2} \in \mathbb{C}^4 \exists (q_{j1} + q_{j2} = q_{j2} + q_{j1}) \in \mathbb{C}^4 \quad (5.24)$$

- **Producto**(C^4, \times)

Asociativa:

$$\forall q_{ji} \in \mathbb{C}^4, i = \overline{1, 3}, \exists ((q_{j1} \times q_{j2}) \times q_{j3} = q_{j1} \times (q_{j2} \times q_{j3})) \in \mathbb{C}^4 \quad (5.25)$$

Elemento Neutro:

$$\begin{aligned} \forall q_{ji} \in \mathbb{C}^4 \exists ! q_I \ni q_{ji} \times q_I = q_{ji}, \text{ ssi} \\ q_I = [1] \in \mathbb{C}^4 \end{aligned} \quad (5.26)$$

Inverso:

$$\forall q_{ji} \exists q_{ji}^* \in \mathbb{C}^4 \ni q_{ji} \times q_{ji}^* = q_I \in \mathbb{C}^4 \quad (5.27)$$

No Comutativo:

$$\forall q_{ji} \in \mathbb{C}^4, i = 1, 2; \exists (q_{j1} \times q_{j2} \neq q_{j2} \times q_{j1}) \in \mathbb{C}^4 \quad (5.28)$$

El campo es descrito por la condición de distributiva, respecto al producto cruz:

Distributiva:

$$\forall q_{ji} \in \mathbb{C}^4; \exists (q_{j1} + q_{j2}) \times q_{j3} = (q_{j1} \times q_{j3}) + (q_{j2} \times q_{j3}) \in \mathbb{C}^4 \quad (5.29)$$

5.1.4.3. Matriz homogénea

Una de las partes correspondientes al análisis cinemático tiene que ver con el establecimiento de varios sistemas coordenados para representar la posición y la orientación de objetos rígidos y las transformaciones entre estos sistemas coordinados [41]. La transformación homogénea combina dos operaciones básicas la rotación y la traslación en una simple matriz de multiplicación [41].

5.1.4.4. Rotación

Para explicar la rotación de marcos de referencia, observe la [Figura 5.3](#) donde se muestra un objeto rígido S a el cual se le atribuido un marco coordenado $x_1y_1z_1$. Si se desea relacionar las coordenadas de un punto P del sólido S, el cual esta referenciado al eje $x_1y_1z_1$ con un nuevo marco de referencia fijo (sin rotar) como lo es x_0, y_0, z_0 se requiere constituir condiciones tales que sean consistentes dicha relación, con el fin de obtener la aportación de ambas referencias respecto a ese punto y al origen “o” que tienen en común. [41].

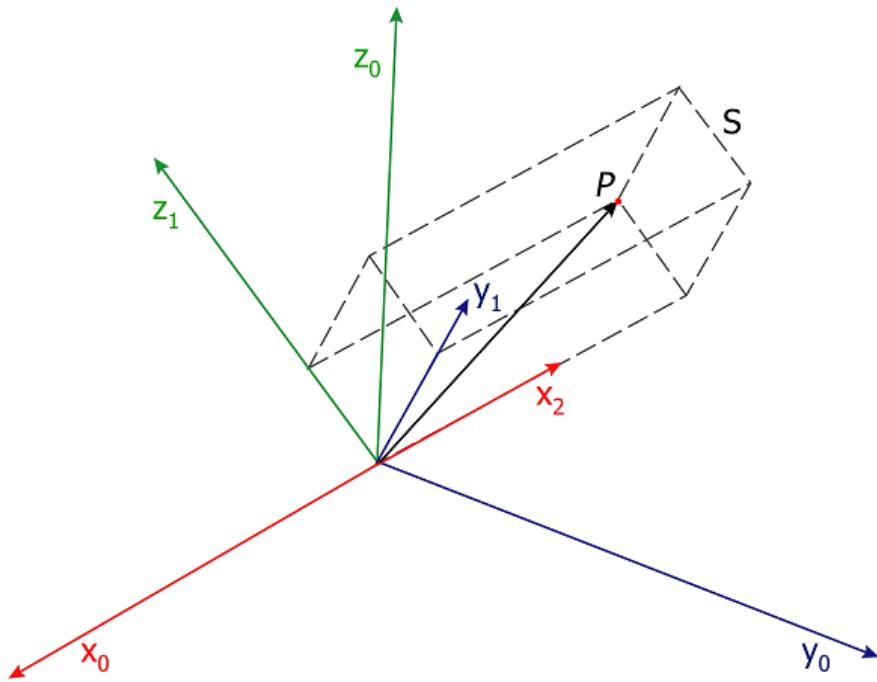


Figura 5.3: Coordenadas de referencia asociado al cuerpo rígido [41].

Sea el conjunto de vectores $\{\hat{i}_1, \hat{j}_1, \hat{k}_1\}$ los componentes de la base orto normal del marco de referencia $ox_1y_1z_1$ e $\{\hat{i}_0, \hat{j}_0, \hat{k}_0\}$ los componentes de la base orto normal del marco de referencia x_0, y_0, z_0 . [6]

Entonces los vectores desde el origen en común a el punto P en el objeto pueden ser representados cualquiera de los dos como :

$$\overrightarrow{PO} = P_{0_x}\hat{i}_0 + P_{0_y}\hat{j}_0 + P_{0_z}\hat{k}_0 \quad (5.30)$$

con relación al eje $x_1y_1z_1$

$$\vec{P1} = P1_x \hat{i}_1 + P1_y \hat{j}_1 + P1_z \hat{k}_1 \quad (5.31)$$

Ya que \hat{i} y \hat{j} son representaciones del mismo vector P la relación entre las componentes de P en los dos marcos de referencia puede ser obtenidos como sigue:

$$P0_x = P0 \hat{i}_0 = P1 \hat{i}_0 \quad (5.32)$$

$$P0_x = P1_x \hat{i}_1 \bullet \hat{i}_0 + P1_y \hat{j}_1 \bullet \hat{i}_0 + P1_z \hat{k}_1 \bullet \hat{i}_0 \quad (5.33)$$

De manera similar para $P0_y, P0_z$

$$\begin{aligned} P0_y &= P1_y \hat{i}_1 \bullet \hat{j}_0 + P1_y \hat{j}_1 \bullet \hat{j}_0 + P1_z \hat{k}_1 \bullet \hat{j}_0 \\ P0_z &= P1_z \hat{i}_1 \bullet \hat{k}_0 + P1_y \hat{j}_1 \bullet \hat{k}_0 + P1_z \hat{k}_1 \bullet \hat{k}_0 \end{aligned} \quad (5.34)$$

Se pueden escribir las tres ecuaciones de la siguiente forma:

$$P0 = R_1^0 P1 \quad (5.35)$$

donde

$$R_1^0 = \begin{bmatrix} \hat{i}_1 \bullet \hat{i}_0 & \hat{j}_1 \bullet \hat{i}_0 & \hat{k}_1 \bullet \hat{i}_0 \\ \hat{i}_1 \bullet \hat{j}_0 & \hat{j}_1 \bullet \hat{j}_0 & \hat{k}_1 \bullet \hat{j}_0 \\ \hat{i}_1 \bullet \hat{k}_0 & \hat{j}_1 \bullet \hat{k}_0 & \hat{k}_1 \bullet \hat{k}_0 \end{bmatrix} \quad (5.36)$$

La matriz de $3x3$ representa la matriz de transformación desde las coordenadas de P con respecto al marco $x_1y_1z_1$ a las coordenadas con respecto al marco x_0, y_0, z_0 . En consecuencia si un punto obtenido es expresado en coordenadas $x_1y_1z_1$ como $P1$ entonces $P0 = R_1^0 P1$ representa el mismo vector expresado relativamente al marco coordenado [41].

Similar mente:

$$P1_x = P1_x \hat{i}_1 \bullet \hat{i}_1 + P1_y \hat{j}_1 \bullet \hat{i}_1 + P1_z \hat{k}_1 \bullet \hat{i}_1 \quad (5.37)$$

De manera similar la matriz que se forma es:

$$P1 = R_1^0 P0 \quad (5.38)$$

donde:

$$R_1^0 = \begin{bmatrix} \hat{i}_0 \bullet \hat{i}_1 & \hat{j}_0 \bullet \hat{i}_1 & \hat{k}_0 \bullet \hat{i}_1 \\ \hat{i}_0 \bullet \hat{j}_1 & \hat{j}_0 \bullet \hat{j}_1 & \hat{k}_0 \bullet \hat{j}_1 \\ \hat{i}_0 \bullet \hat{k}_1 & \hat{j}_0 \bullet \hat{k}_1 & \hat{k}_0 \bullet \hat{k}_1 \end{bmatrix} \quad (5.39)$$

Entonces la matriz R_1^0 representa la inversa de la transformación R_0^1 , el producto punto es commutativo por lo cual $\hat{i}_1 \bullet \hat{j}_0 = \hat{j}_0 \bullet \hat{i}_1$ así que:

$$R_1^0 = (R_0^1)^{-1} = (R_0^1)^T \quad (5.40)$$

Por otra parte suponemos que el marco $x_1y_1z_1$ presenta una rotación respecto a un ángulo θ sobre el eje z y se desea encontrar la matriz de transformación resultante , por convención el signo positivo el ángulo θ es obtenido por la regla de la mano derecha, que es una rotación positiva de grados θ sobre el eje z en el cual avanzaría deslizándose en forma de tornillo sobre el eje z . En la [Figura 5.4](#) se puede ver que.

$$\hat{j}_1 \bullet \hat{i}_0 = -\sin \psi \quad \hat{i}_1 \bullet \hat{j}_0 = \sin \psi \quad (5.41)$$

$$\hat{i}_0 \bullet \hat{i}_1 = \cos \varphi \quad \hat{j}_0 \bullet \hat{j}_1 = \cos \theta \quad (5.42)$$

$$\hat{k}_0 \bullet \hat{k}_1 = 1 \quad (5.43)$$

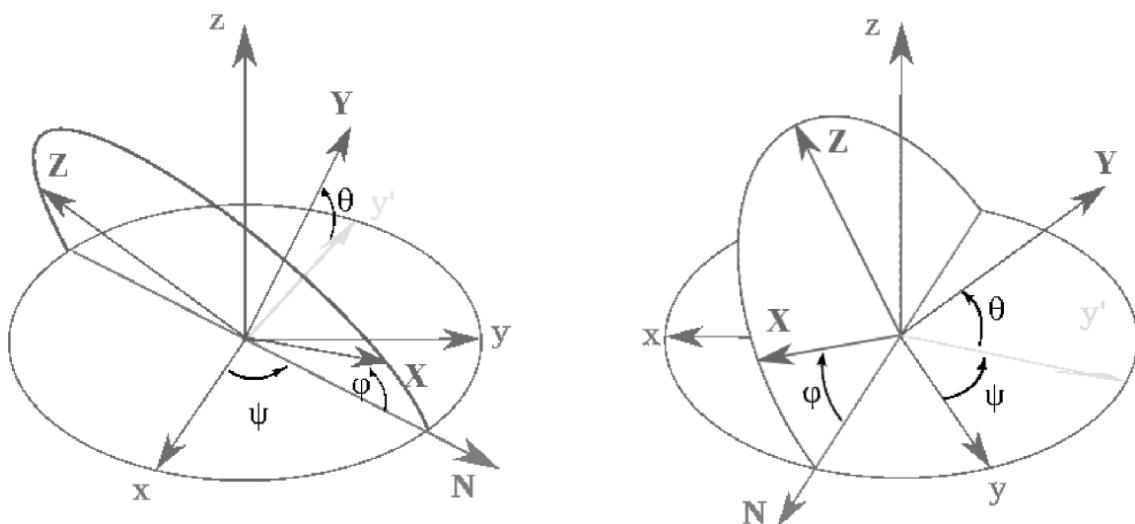


Figura 5.4: Rotación sobre ejes canónicos [41].

y los otros productos son ceros. Así la transformación tiene una forma particular

$$R_1^0 = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & 0 \\ \sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5.44)$$

La Ecuación 5.44 es llamada matriz básica de rotación (sobre el eje z). Para estas matrices se utiliza la notación Rz_θ , es fácil verificar que esta matriz , tiene las siguientes propiedades [41]:

$$\begin{aligned} R_{z,0} &= I \\ R_{z,\theta} R_{z,\varphi} &= R_{z,\theta+\varphi} \\ R_{z,\theta}^{-1} &= R_{z,-\theta} \end{aligned} \quad (5.45)$$

Similar mente las matrices de rotación sobre los ejes x e y ejes se obtiene:

$$R_{x,\theta} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta & -\sin \theta \\ 0 & \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \quad (5.46)$$

$$R_{y,\theta} = \begin{bmatrix} \cos \theta & 0 & -\sin \theta \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \theta & 0 & \cos \theta \end{bmatrix} \quad (5.47)$$

A partir de la definición de las coordenadas homogéneas surge inmediatamente el concepto de matriz de transformación homogénea. Se define como matriz de transformación homogénea T a una matriz de dimensión 4*4 que representa la transformación de un vector de coordenadas homogéneas de un sistema de coordenadas a otro [41].

$$T = \left[\begin{array}{c|c} R_{3*3} & p_{3*1} \\ \hline f_{1*3} & w_{1*1} \end{array} \right] = \left[\begin{array}{c|c} \text{Rotación} & \text{Traslación} \\ \hline \text{Perspectiva} & \text{Escalado} \end{array} \right] \quad (5.48)$$

Así pues, se puede considerar que una matriz homogénea se haya compuesta por cuatro submatrices de distinto tamaño: una submatriz R_{3*3} que corresponde a una matriz de rotación; una submatriz p_{3*1} que corresponde al vector de traslación; una submatriz f_{1*3} que representa una transformación de perspectiva, y una submatriz que representa un escalado global. En robótica generalmente solo interesara conocer el valor de R_{3*3} y de p_{3*1} , considerándose las componentes f_{1*3} nulas y la de w_{1*1} la unidad. Al tratarse de una matriz 4*4, los vectores sobre los que se aplique deberán contar con 4 dimensiones, que serán las coordenadas homogéneas del vector tridimensional de que se trate [41]. Considerando la transformación de perspectiva nula y el escalado global unitario, la matriz homogénea T resultara de la siguiente forma:

$$T = \begin{bmatrix} R_{3*3} & | & p_{3*1} \\ 0 & | & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \text{Rotación} & | & \text{Traslación} \\ 0 & | & 1 \end{bmatrix} \quad (5.49)$$

que representa la orientación y posición de un sistema O'UVW rotado y trasladado con respecto al sistema de referencia OXYZ. Esta matriz sirve para conocer las coordenadas (rx,ry,rz) del vector r en el sistema OXYZ a partir de sus coordenadas (ru,rv,rw) en el sistema O'XYZ [41]:

$$\begin{bmatrix} r_x \\ r_y \\ r_z \\ 1 \end{bmatrix} = T \begin{bmatrix} r_u \\ r_v \\ r_w \\ 1 \end{bmatrix} \quad (5.50)$$

En resumen, una matriz de transformación homogénea se puede aplicar para [41]:

1. Representar la posición y orientación de un sistema girado y trasladado O'UVW con respecto a un sistema fijo de referencia oxyz, que es lo mismo que representar una rotación y traslación realizada sobre un sistema de referencia.
2. Transformar un vector expresado en coordenadas con respecto a un sistema O'UVW, a su expresión en coordenadas del sistema de referencia OXYZ.
3. Rotar y trasladar un vector con respecto a un sistema de referencia fijo OXYZ.

5.1.4.5. Algoritmo de Denavit-Hartenberg

DENAVIT y HARTENBERG propusieron en 1955 un método matricial que permite establecer de manera sistemática un sistema de coordenadas (S_i) ligado a cada eslabón i de una cadena articulada, pudiéndose determinar a continuación las ecuaciones cinemáticas de la cadena completa [41].

Según la representación D-H, escogiendo adecuadamente los sistemas de coordenadas asociados para cada eslabón, será posible pasar de la posición actual a la siguiente mediante 4 transformaciones básicas que dependen exclusivamente de las características geométricas del eslabón [41].

Estas transformaciones básicas consisten en una sucesión de rotaciones y traslaciones que permitan relacionar el sistema de referencia del elemento i con el sistema del elemento $i-1$ [41]. Las transformaciones en cuestión son las siguientes:

- Rotación alrededor del eje Z_{i-1} un ángulo q_i .
- Traslación a lo largo de Z_{i-1} una distancia d_i ; vector d_i $(0, 0, d_i)$.
- Traslación a lo largo de X_i una distancia a_i ; vector a_i $(0, 0, a_i)$.

- Rotación alrededor del eje X_i , un ángulo a_i .

Luego entonces la Matriz de transformación Homogénea se representa de la siguiente manera [41]:

$$A_i = \left[\begin{array}{c|c} R_{i-1}^i & D_{i-1}^i \\ \hline 0 & 1 \end{array} \right] = Rotación_{(z,\theta_i)} Desplazamiento_{(0,0,d_i)} Desplazamiento_{(a_i,0,0)} Rotación_{(x,\alpha_i)} \quad (5.51)$$

donde R_{i-1}^i = Matriz de Rotación y D_{i-1}^i =Matriz de Traslación (Desplazamiento) .

Los productos antes descritos no son comutativos, los elementos que componen estos son de 2 tipos:

Matrices de Rotación:

$$R_Z = \left[\begin{array}{ccc|c} \cos \theta_n & -\sin \theta_n & 0 & 0 \\ \sin \theta_n & \cos \theta_n & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ \hline 0 & 0 & 0 & 1 \end{array} \right] \quad R_X = \left[\begin{array}{ccc|c} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha_n & -\sin \alpha_n & 0 \\ 0 & \sin \alpha_n & \cos \alpha_n & 0 \\ \hline 0 & 0 & 0 & 1 \end{array} \right] \quad (5.52)$$

y Matrices de Traslación:

$$D_z = \left[\begin{array}{ccc|c} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_n \\ \hline 0 & 0 & 0 & 1 \end{array} \right] \quad D_x = \left[\begin{array}{ccc|c} 1 & 0 & 0 & a_n \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ \hline 0 & 0 & 0 & 1 \end{array} \right] \quad (5.53)$$

y el resultado de ese mismo es:

$$A_i^{i-1} = \left[\begin{array}{ccc|c} C\theta_i & -S\theta_i & 0 & 0 \\ S\theta_i & C\theta_i & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ \hline 0 & 0 & 0 & 1 \end{array} \right] \left[\begin{array}{ccc|c} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_i \\ \hline 0 & 0 & 0 & 1 \end{array} \right] \left[\begin{array}{ccc|c} 1 & 0 & 0 & a_i \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ \hline 0 & 0 & 0 & 1 \end{array} \right] \left[\begin{array}{ccc|c} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & C\theta_i & -S\theta_i & 0 \\ 0 & S\theta_i & C\theta_i & 0 \\ \hline 0 & 0 & 0 & 1 \end{array} \right] \quad (5.54)$$

$$= \left[\begin{array}{ccc|c} C\theta_i & -C\alpha_i S\theta_i & S\alpha_i S\alpha_i & a_i C\theta_i \\ S\theta_i & C\alpha_i C\theta_i & -S\alpha_i C\theta_i & a_i S\theta_i \\ 0 & S\alpha_i & C\alpha_i & d_i \\ \hline 0 & 0 & 0 & 1 \end{array} \right] \quad (5.55)$$

donde $C\theta_i = \cos \theta_i$ y $S\theta_i = \sin \theta_i$

Por otra parte para conocer la Matriz de transformación Homogénea Total de un sistema se recurre a multiplicar las A correspondientes a cada sección de estudio

$$T_n^0(q_i) = \prod A_i^{i-1} = A_1^0 * A_2^1 * A_3^2 * A_4^3 * \dots * A_i^{i-1} \quad (5.56)$$

Para que la matriz A_i^{i-1} relacione los sistemas (S_i) y (S_{i-1}) es necesario que los mismos se hayan escogido de acuerdo a unas determinadas normas presentes en el algoritmo.

A continuación se presenta el algoritmo de DENAVIT-HARTENBERG para la solución de la cinemática directa[41]:

Cuadro 5.1: Algoritmo de DENAVIT-HARTENBERG

DH1	Numerar los eslabones comenzando con 1 (primer eslabón móvil de la cadena) y acabando con n (ultimo eslabón móvil). Se numerara como eslabón 0 a la base fija del robot.
DH2	Numerar cada articulación comenzando por 1 (la correspondiente al primer grado de libertad y acabando en n).
DH3	Localizar el eje de cada articulación. Si esta es rotativa, el eje será su propio eje de giro. Si es prismática, será el eje a lo largo del cual se produce el desplazamiento.
DH4	Para i de 0 a n-1, situar el eje Zi, sobre el eje de la articulación i+1.
DH5	Situar el origen del sistema de la base (S0) en cualquier punto del eje Z0. Los ejes X0 e Y0 se situaran de modo que formen un sistema dextrógiro con Z0.
DH6	Para i de 1 a n-1, situar el sistema (Si) (solidario al eslabón i) en la intersección del eje Zi con la línea normal común a Zi-1 y Zi. Si ambos ejes se cortasen se situaría (Si) en el punto de corte. Si fueren paralelos (Si) se situaría en la articulación i+1.
DH7	Situar Xi en la línea normal común a Zi-1 y Zi.
DH8	Situar Yi de modo que forme un sistema dextrógiro con Xi y Zi.
DH9	Situar el sistema (Sn) en el extremo del robot de modo que Zn coincida con la dirección de Zn-1 y Xn sea normal a Zn-1 y Zn.
DH10	Obtener θ_i como el ángulo que hay que girar en torno a Zi-1 para que Xi-1 y Xi queden paralelos.
DH11	Obtener di como la distancia, medida a lo largo de Zi-1, que habría que desplazar (Si-1) para que Xi y Xi-1 quedasen alineados.
DH12	Obtener ai como la distancia medida a lo largo de Xi (que ahora coincidiría con Xi-1) que habría que desplazar el nuevo (Si-1) para que su origen coincidiese con (Si).
DH13	Obtener ai como el ángulo que habría que girar entorno a Xi (que ahora coincidiría con Xi-1), para que el nuevo (Si-1) coincidiese totalmente con (Si).
DH14	Obtener las matrices de transformación .
DH15	Obtener la matriz de transformación que relaciona el sistema de la base con el del extremo del robot
DH16	La matriz T define la orientación (submatriz de rotación) y posición (submatriz de translación) del extremo referido a la base en función de las n coordenadas articulares.

5.2. Matemáticas aplicadas

5.2.1. Identidades trigonométricas

Las siguientes identidades trigonométricas se utilizan en el desarrollo del algoritmo de Denavit-Hartenberg :

Sean a y b ángulos de rango $[0, 2\pi]$:

$$\operatorname{sen}(a \pm b) = \operatorname{sen}(a) * \cos(b) \pm \cos(a) * \operatorname{sen}(b) \quad (5.57)$$

$$\cos(a \pm b) = \cos(a) * \cos(b) \mp \operatorname{sen}(a) * \operatorname{sen}(b) \quad (5.58)$$

$$\operatorname{sen}(-a) = -\operatorname{sen}(a) \quad \cos(-a) = \cos(a) \quad (5.59)$$

5.2.2. Método de diferencias finitas:

La idea del método de diferencias finitas consiste en aproximar las derivadas de una ecuación diferencial de forma que se reduzca a resolver un sistema lineal.[\[42\]](#). En esta sección se explican las aproximaciones de $y'(x)$ y $y''(x)$, a partir del desarrollo de Taylor. Estas aproximaciones son la base de los **métodos de diferencias finitas**.

Considerando el desarrollo de Taylor de segundo orden, para una función $y(x)$:

$$y(t) = y(t_0) + y'(t_0)(t - t_0) + y''(t_0) \frac{(t - t_0)^2}{2} + \dots \quad (5.60)$$

Si $t_0 = x$, $t = x + h$, se tiene:

$$y(x + h) \approx y(x) + y'(x)h + y''(x) \frac{h^2}{2} \quad (5.61)$$

Si $t_0 = x$, $t = x - h$, se obtiene:

$$y(x - h) \approx y(x) - y'(x)h + y''(x) \frac{h^2}{2} \quad (5.62)$$

Restando ambas expresiones y despejando el valor de $y'(x)$, por lo tanto, se tiene una aproximación de segundo orden a la derivada a la función en un punto:

$$y'(x) \approx \frac{y(x+h) - y(x-h)}{2h} \quad (5.63)$$

Usando el desarrollo de Taylor de cuarto orden, se llega a:

$$y(t) = y(t_0) + y'(t_0)(t - t_0) + y''(t_0)\frac{(t - t_0)^2}{2!} + y'''(t_0)\frac{(t - t_0)^3}{3!} + y^{(iv)}(t_0)\frac{(t - t_0)^4}{4!} + \dots \quad (5.64)$$

Si $t_0 = x$, $t = x + h$, se tiene:

$$y(x+h) \approx y(x) + y'(x)h + y''(x)\frac{h^2}{2} + y'''(x)\frac{(h)^3}{3!} + y^{(iv)}(x)\frac{(h)^4}{4!} \quad (5.65)$$

Si $t_0 = x$, $t = x - h$, se obtiene:

$$y(x-h) \approx y(x) - y'(x)h + y''(x)\frac{h^2}{2} - y'''(x)\frac{(h)^3}{3!} + y^{(iv)}(x)\frac{(h)^4}{4!} \quad (5.66)$$

Sumando ambas expresiones y despejando el valor de $y''(x)$ se tiene una aproximación de segundo orden a la derivada a la función en un punto:

$$y''(x) \approx \frac{y(x+h) - 2y(x) - y(x-h)}{h^2} \quad (5.67)$$

Considerando Ecuación 5.63 y Ecuación 5.67, se despeja $y(x)$

$$y(x+h) \approx h^2 y''(x) + 2y(x) + y(x-h) \quad (5.68)$$

Aplicando la definición de derivada:

$$\frac{df(x)}{dx} = \lim_{\Delta x \rightarrow \varepsilon} \frac{f(x) - f(x - \Delta x)}{\Delta x} \quad (5.69)$$

Evaluando el límite:

$$\frac{df(x)}{dx} \underset{\varepsilon}{\sim} \frac{f(x) - f(x - \varepsilon)}{\varepsilon} \quad (5.70)$$

Despejando $f(x)$ obtenemos la ecuación de Euler donde ε representa el tamaño del paso:

$$f(x) \simeq \varepsilon \frac{df(x)}{dx} + f(x - \varepsilon) \quad (5.71)$$

Análogamente para la segunda derivada tenemos:

$$\frac{d^2f(x)}{dx^2} = \frac{d}{dx} \left(\lim_{\Delta x \rightarrow \varepsilon} \frac{f(x) - f(x - \Delta x)}{\Delta x} \right) \quad (5.72)$$

$$\frac{df(x)}{dx} = \lim_{\Delta x \rightarrow \varepsilon} \frac{1}{\Delta x} \left(\frac{df(x)}{dx} - \frac{df(x - \Delta x)}{d(x - \Delta x)} \right) \quad (5.73)$$

$$\frac{df(x)}{dx} = \lim_{\Delta x \rightarrow \varepsilon} \frac{1}{\Delta x} \left(\frac{f(x) - f(x - \Delta x)}{\Delta x} - \frac{f(x - \Delta x) - f(x - 2\Delta x)}{\Delta x} \right) \quad (5.74)$$

$$\frac{df(x)}{dx} = \lim_{\Delta x \rightarrow \varepsilon} \frac{f(x) - 2f(x - \Delta x) + f(x - 2\Delta x)}{(\Delta x)^2} \quad (5.75)$$

Evaluando el límite:

$$\frac{df(x)}{dx} \simeq \frac{f(x) - 2f(x - \varepsilon) + f(x - 2\varepsilon)}{(\varepsilon)^2} \quad (5.76)$$

Despejando $f(x)$ donde ε representa el tamaño del paso:

$$f(x) \simeq \frac{d^2f(x)}{dx^2} \varepsilon^2 + 2f(x - \varepsilon) - f(x - 2\varepsilon) \quad (5.77)$$

La Ecuación 5.71 y Ecuación 5.77 son las ecuaciones en diferencias finitas que se utilizaran en el programa del microcontrolador que procesa la información de los sensores iniciales.

5.2.3. Análisis estadístico

El análisis estadístico de datos de mediciones permite obtener una determinación analítica de la incertidumbre del resultado final. El resultado de un método de medición se puede predecir con base al muestreo de datos sin tener información detallada de todos los factores de perturbación [93].

5.2.3.1. Media aritmética

El valor mas probable de una variable medida es la media aritmética del número de lecturas tomadas. Cuando el número de lecturas de la misma cantidad es muy grande, se obtiene una mejor aproximación. La media aritmética esta dada por la siguiente ecuación [93].

$$\bar{x} = \frac{x_1 + x_2 + x_3 + \dots + x_n}{n} = \frac{\sum x}{n} \quad (5.78)$$

donde \bar{x} es la media aritmética, x_1, x_2, x_n son lecturas tomadas y n es el número de lecturas.

5.2.3.2. Rango promedio:

El rango promedio es la tolerancia de la lectura medida y se representa como $a \pm ran\bar{g}o$ donde a es el valor de la media aritmética [93].

$$ran\bar{g}o = \frac{x_{max} + x_{min}}{2} \quad (5.79)$$

5.2.3.3. Media móvil simple de orden k:

Es la media de las k últimas observaciones de la serie, donde n es el numero de datos a promediar.

$$SMA = \frac{\sum_{k=1}^n x_k}{n} \quad (5.80)$$

5.2.4. Ángulos de Euler:

Los ángulos de Euler constituyen un conjunto de tres coordenadas angulares que sirven para especificar la orientación de un sistema de referencia de ejes ortogonales, normalmente móvil, respecto a otro sistema de referencia de ejes ortogonales normalmente fijos. Fueron introducidos por **Leonhard Euler** en mecánica del sólido rígido para describir la orientación de un sistema de referencia solidario con un sólido rígido en movimiento. Dados dos sistemas de coordenadas xyz y XYZ con origen común, es posible especificar la posición de un sistema en términos del otro usando tres ángulos α , β y γ . La definición matemática es estática y se basa en escoger dos planos, uno en el sistema de referencia y otro en el triedro rotado. En el esquema adjunto serían los planos xy y XY. Escogiendo otros planos se obtendrían distintas convenciones alternativas, las cuales se llaman de Tait-Bryan cuando los planos de referencia son no-homogéneos (por ejemplo xy y XY son homogéneos, mientras xy y XZ no lo son).

$$\theta = \tan^{-1} \left(\frac{A_x}{\sqrt{A_y^2 + A_z^2}} \right) \quad \psi = \tan^{-1} \left(\frac{A_y}{\sqrt{A_x^2 + A_z^2}} \right) \quad \phi = \tan^{-1} \left(\frac{\sqrt{A_x^2 + A_y^2}}{A_z} \right) \quad (5.81)$$

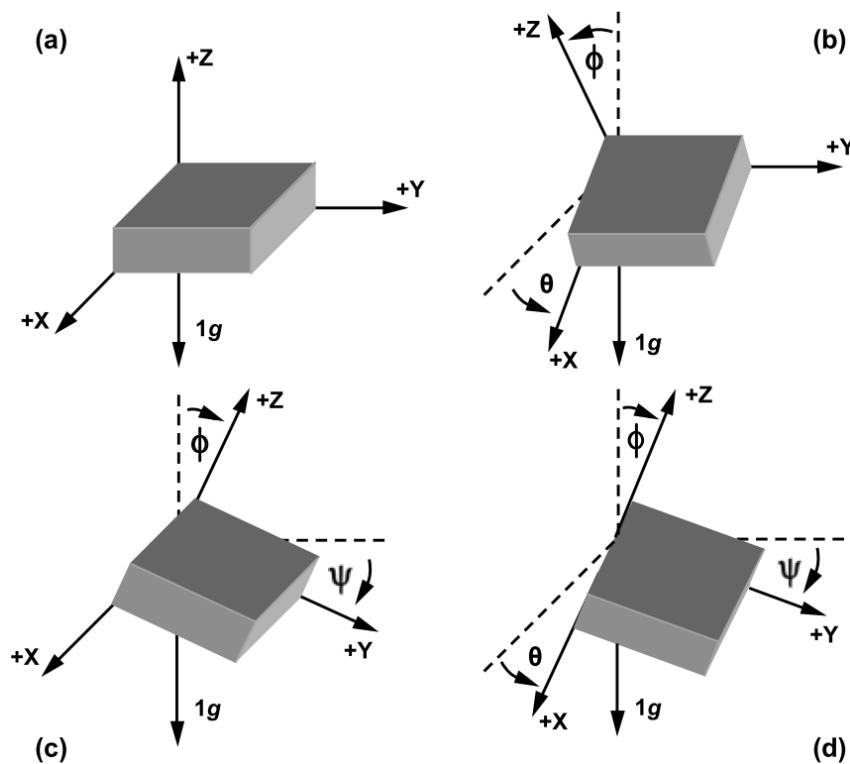


Figura 5.5: Esquema de los ángulos de Euler y los ejes de coordenadas.

5.2.5. Ángulos de navegación (Tait-Bryan)

Los ángulos de navegación son un tipo de ángulos de Euler usados para describir la orientación de un objeto en 3 dimensiones. Si se tiene un sistema de coordenadas móvil respecto de uno fijo, en 3 dimensiones, y se desea dar la posición del sistema móvil en un momento dado, hay varias posibilidades de hacerlo. Una de ellas son los ángulos de navegación. Los ángulos de navegación, llamados en matemáticas ángulos de Tait-Bryan, son 3 coordenadas angulares que definen un triángulo rotado desde otro que se considera el sistema de referencia. Se definen matemáticamente de forma similar a los ángulos de Euler, pero en vez de usar como línea de nodos el corte entre dos planos homólogos (por ejemplo el XY es el homólogo del xy), se utilizan dos planos no homólogos (por ejemplo XY e yz).

Los 3 ángulos son la dirección o **yaw** (Ψ) rotación alrededor del eje Z , elevación o **pitch** (ϑ) rotación alrededor del eje Y y ángulo de giñada o **roll** (ϕ) rotación alrededor del eje X. Estos 3 ángulos son equivalentes a 3 maniobras consecutivas. Dado un sistema de 3 ejes fijos en el aeroplano, existen 3 rotaciones principales, normalmente llamadas igual que el eje sobre el que se producen, que permiten alcanzar el sistema del aeroplano desde el sistema de referencia, donde el eje X apunta hacia al frente del móvil, el eje Y apunta hacia la derecha y el eje Z es normal al móvil (ver [Figura 5.6](#)).

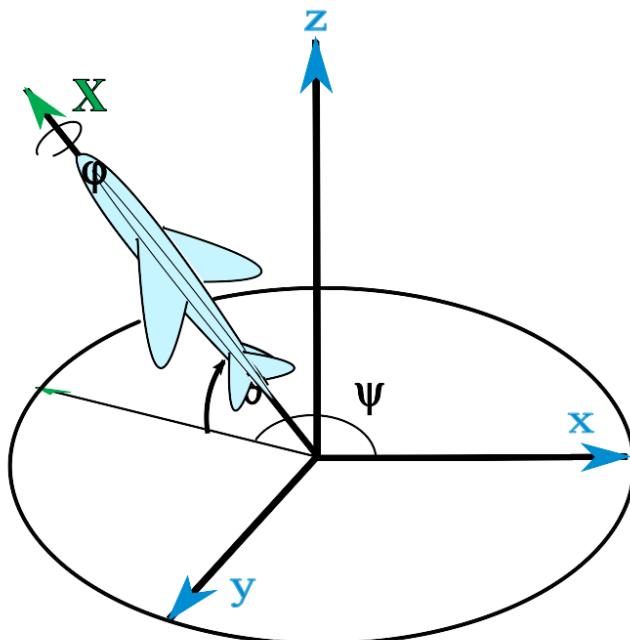


Figura 5.6: Ángulos de navegación o de Tait-Bryan

5.3. Biomecánica

La biomecánica es el estudio del comportamiento mecánico de una estructura biológica del movimiento normal y ante una situación de carga o tensión. Básicamente, en biomecánica se pueden realizar tres tipos de estudios. Hay **estudios descriptivos**, que aportan información sobre la ejecución de movimiento, este tipo de estudios son los primeros que se realizan cuando se quiere conocer un tipo de movimiento nuevo y la estructura es desconocida. Por otra parte están los **estudios experimentales**, con el fin de identificar las relaciones entre algunas de las variables de movimiento, en estos estudios se plantea una pregunta y los resultados de la experiencia se usan para verificar la hipótesis planteada. El tercer tipo de investigación corresponde a los **teóricos o de modelización**, en esta investigación la información que se obtiene se utiliza para desarrollar un modelo predictivo, generalmente un modelo matemático o un conjunto de ecuaciones descritas por ejemplo, por las leyes de NEWTON [34].

Como se puede deducir la **biomecánica** es un cuerpo de conocimientos amplios por lo que ha sido necesario dividir en varias sub-disciplinas, cabe destacar que la línea de distinción entre una y otra es muy delgada provocando en ocasiones la interrelación entre ellas, aun y con esto se puede dividir en tres sub-grupos principales [34]:

1. Biomecánica Médica
2. Biomecánica Ocupacional.
3. Biomecánica de la actividad física y deportiva

La Biomecánica Médica esta sub-disciplina de la biomecánica actualmente representa un terreno en auge y se especializa en [34]:

1. Biomecánica aplicada a la Traumatología
2. Biomecánica aplicada a la Rehabilitación
3. Biomecánica aplicada a la Fisiología
4. Biomecánica ortopédica

La Biomecánica Ocupacional esta relacionado con los ambientes laborales en el uso de la ergonomía con el objeto de la adaptación mejorando las condiciones físicas y psíquicas del ambiente laboral [34].

La Biomecánica de la actividad física y deportiva estudia los aspectos mecánicos que explican algunas situaciones deportivas, tales como calcular el ángulo de lanzamiento de peso. En otras ocasiones, proporciona una base científica y en otro sentido demuestra como puede obtenerse ventajas en el análisis de técnicas deportivas, en los implementos utilizados y/o los objetos que el deportista golpea o lanza [34].

5.3.1. Movimiento de los cuerpos en un sistema de referencia

El análisis del movimiento humano requiere la descripción detallada de los cambios de posición del cuerpo, o de sus segmentos (cinemática), así como identificación de las causas que lo producen (cinética) [34].

El primer paso de análisis consiste en identificar el cuerpo o grupos de cuerpos, segmentos y/u objetos para describir. Además de lo anterior es necesario identificar el lugar o el marco de referencia donde tiene lugar el movimiento. Un sistema de referencia será el lugar desde el que se lleva a cabo la medición (observación) [34].

El sistema de referencia puede ser fijo o puede también hallarse en movimiento. Al primero se le denomina **sistema de referencia absoluto**, mientras al que se encuentra en movimiento se nombra como **sistema de referencia relativo**. En el caso de los sistemas de referencia absolutos, los tres ejes de orientación espaciales (x, y, z) se cruzan en el eje articular de movimiento y los cambios de posición del segmento se describen respecto a este eje articular. En el caso de los sistemas de referencia relativos, la posición de un segmento se describe en función de la posición de su segmento adyacente [34].

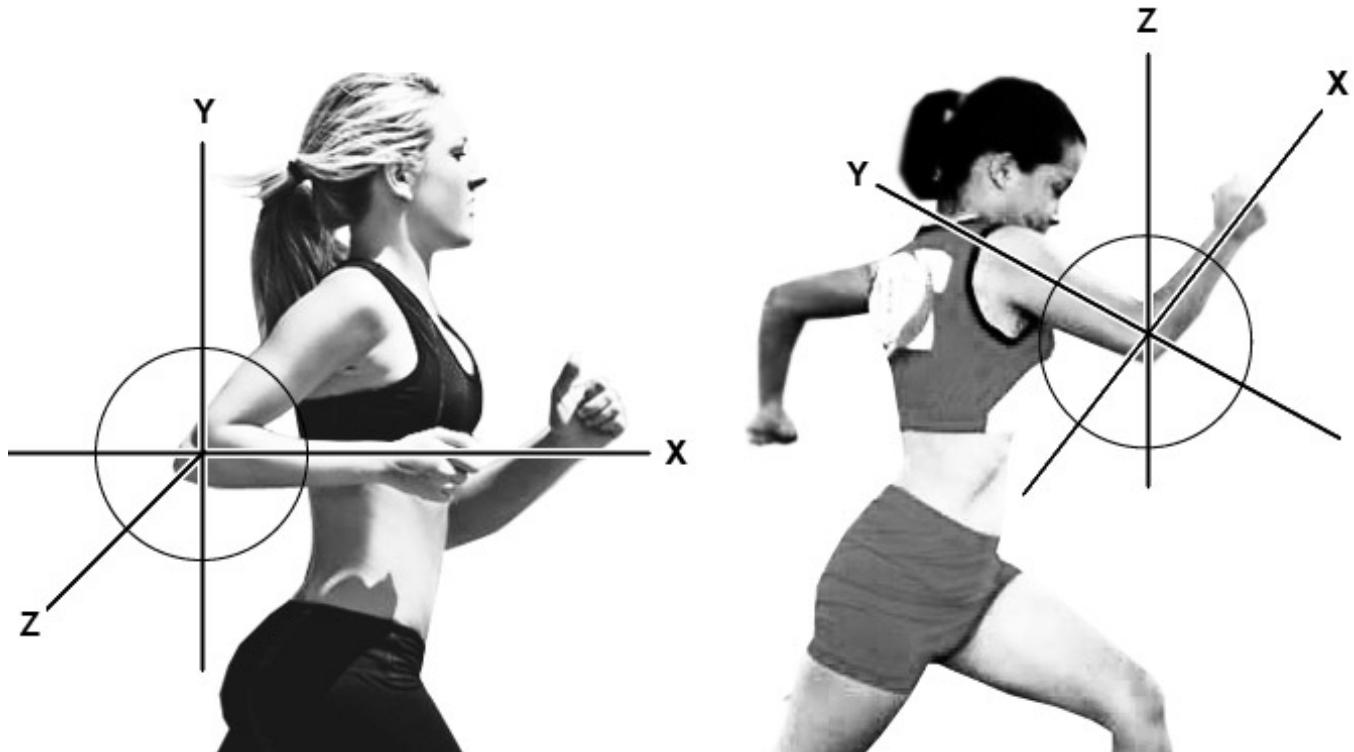


Figura 5.7: Sistema de referencia absoluto y relativo [34].

5.3.2. Orientación del cuerpo móvil en el espacio

El sistema de coordenadas es la forma de orientar y situar los cambios de posición de un cuerpo móvil (objeto o cuerpo en movimiento del que se quiere estudiar). Las 3 posiciones que podrán tomar los segmentos serán la dirección X , la Y o la Z . cualquier dirección paralela al suelo se identificará como horizontal y cualquier dirección perpendicular al eje horizontal corresponde al eje vertical [34].

La dirección X es paralela al suelo y normalmente el avance de los cuerpos en movimiento hacia atrás o hacia delante. La dirección denominada Z corresponde a los cambios de posiciones verticales (dirección de acción de la gravedad) y es perpendicular a las otras dos direcciones. La dirección Y es paralela al suelo e indica los movimientos laterales relativos al cuerpo, es decir derecha o izquierda [34].

Recientemente, la sociedad Internacional de Biomecánica, con el propósito de estandarizar la orientación de los ejes cartesianos en la Biomecánica deportiva propone indicar la Y en la posición vertical [34].

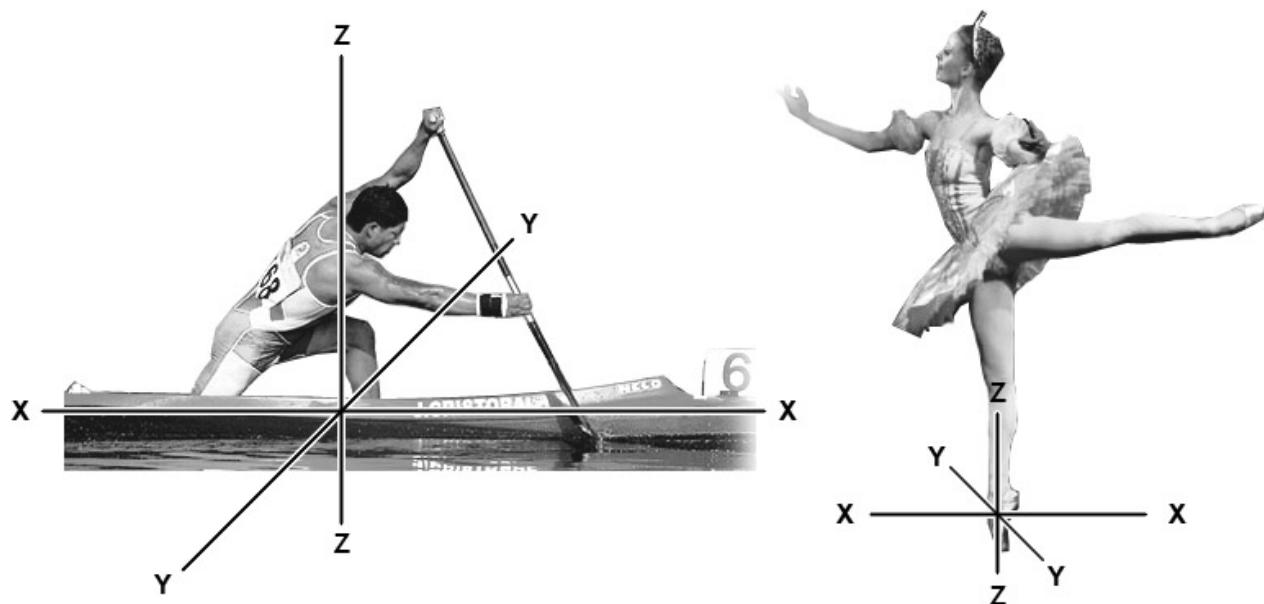


Figura 5.8: Orientación relativa a los ejes espaciales x,y, y z del cuerpo de un paragüista (A) y de un pie de bailarina (B) [34].

5.3.3. Tipos de movimientos según la trayectoria: rotación, traslación y mixtos

El cambio de posición de un cuerpo puede ser clasificado según la trayectoria que describa en movimiento de traslación, de rotación y combinados. Una traslación en un cuerpo supone un cambio de posición de un sitio a otro dentro de un sistema de referencias. Si el camino que recorre es lineal se denomina “trayectoria rectilínea” y si describe una curva se trata de una “trayectoria curvilínea”. En las translaciones (rectilínea y curvilínea) cada uno de los puntos del cuerpo recorre el mismo espacio en el mismo tiempo. Por ejemplo, el (A) de la [Figura 5.8](#) desplazándose únicamente en dirección X estaría describiendo una trayectoria rectilínea [34].

En el movimiento rotatorio o angular, cada parte del cuerpo describe el mismo ángulo en el mismo tiempo. En este tipo de movimiento el cuerpo se dice que gira o rota sobre un eje de movimiento. En el cuerpo humano cada segmento esta unido a su adyacente formando las articulaciones, que son **puntos fijos** sobre los que tiene lugar los cambios de posición (rotación) de los segmentos. Por ejemplo, cuando se hace una flexión de antebrazo, tanto éste como la mano con el peso que esta sujetando rotarán sobre la articulación del codo [34].

El cambio en la posición durante un movimiento de rotación o angular se llama **desplazamiento angular** y se designa con la letra griega teta (θ). El desplazamiento que recorre el cuerpo durante una rotación se mide en unidades de desplazamiento angular, como las revoluciones, grados o radianes (ver [Figura 5.9](#)) [34].



Figura 5.9: Los movimientos de rotación se producen sobre ejes articulares (A). Cuanto mayor es el radio de giro hay mayor trayectoria circular (B) [34].

Debido a la estructura del esqueleto humano y las articulaciones de sus segmentos, la mayoría de los cambios de posición son del tipo angular o rotacional. En realidad, las translaciones que realizan

el cuerpo humano se hacen a partir de rotación de sus segmentos corporales. En la [Figura 5.10](#) se muestra como la translación del centro de gravedad de una persona cuando se levanta una silla se origina gracias a la suma de las rotaciones individuales sobre las articulaciones del tobillo, rodilla y cadera [34].



Figura 5.10: Translación del centro de gravedad de una persona levantándose de una silla [34].

En el deporte también es frecuente observar una combinación de translaciones (lineales o curvilíneas) y movimientos de rotación. Se pueden observar los movimientos de rotación de rodilla y cadera durante el pedaleo en ciclismo, combinado con el movimiento de translación del sistema ciclista + bicicleta (ver [Figura 5.11](#)), o durante el desplazamiento en la silla de rueda [34].

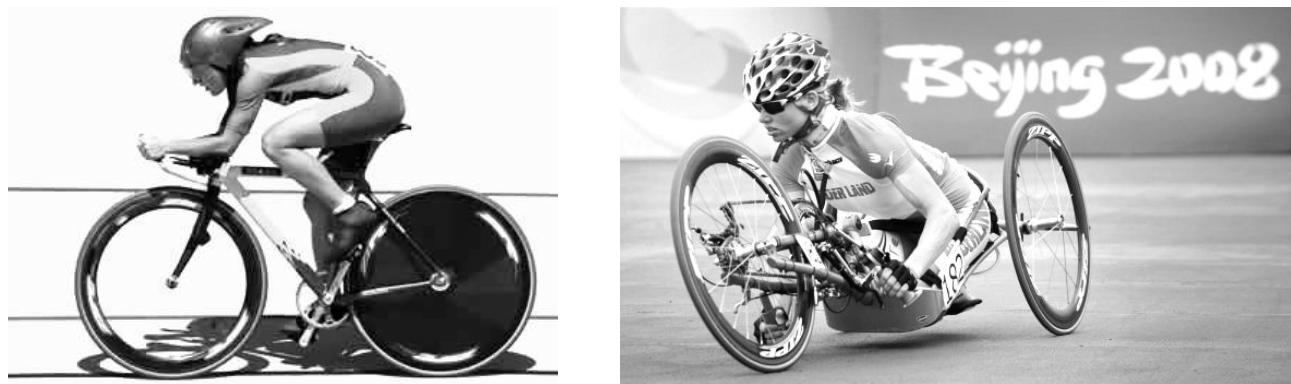


Figura 5.11: Movimientos combinados de rotación de las articulaciones de tobillo, rodilla y cadera translación (izq.) o del movimiento combinado de las articulaciones del hombro, codo y muñeca en la silla de rueda (der.) [36].

5.3.4. El esqueleto humano y sus movimientos

El esqueleto humano es considerado un sistema formado por segmentos móviles unidos. El mismo, si se entiende de esta manera, puede dividirse en los huesos que lo conforman. Sin embargo, desde un punto de vista práctica y con el propósito de describir el movimiento, es frecuente dividir el esqueleto en los siguientes segmentos funcionales: cabeza, zona cervical (cuello), tronco (zona vertebral torácica y lumbar, pelvis y sacro), muslo, pierna o pantorrilla, pie, cintura escapular, brazo, antebrazo y mano [34].

5.3.5. Posición anatómica y fundamental

La descripción de la posición o los movimientos de una articulación se expresan a una posición inicial. Esta es considerada **el origen o la posición cero**. En esta posición, el cuerpo está en bipedestación (posición del cuerpo humano de estar erguido y sostenido sobre sus 2 pies) con la cabeza mirando al frente y con las palma de las manos mirando hacia el frente. Sin embargo, aunque esta posición es conveniente para describir la posición del movimiento, la mayoría de los biomecánicos prefieren utilizar la denominada **posición anatómica** (ver Figura 5.12).

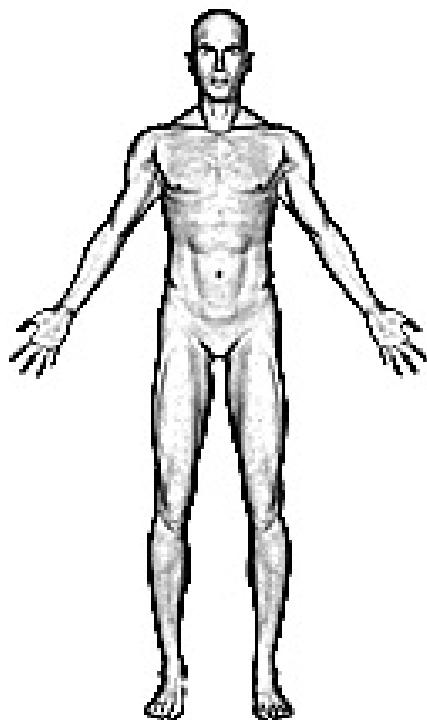


Figura 5.12: Esquema de la posición anatómica del cuerpo humano. [34].

5.3.6. Descriptores anatómicos

Una correcta ubicación del movimiento o localización anatómica está relacionada con el uso de una terminología universalmente aceptada y comprendida por del Ámbito de las ciencias de la actividad física y el deporte. Las ventajas de usar adecuadamente los términos se traducen en mejorar la efectividad del proceso aprendizaje y/o la corrección de una habilidad técnica [34].

El término medial se refiere a una posición anatómica relativamente cercana a la línea media del cuerpo u objeto. Por el contrario, el término lateral describe una posición mas alejada a la línea media del cuerpo. Por ejemplo los dedos meñiques y el pulgar esta en una posición lateral [34].

Los siguientes términos corresponden a **proximal** y **distal** con ellos se describe a partir de un punto de referencia las posiciones relativas. El primero hace alusión a la posición más cercana al punto de referencia y el segundo a la más lejana. Por ejemplo, el codo es proximal y la muñeca es distal a la articulación del hombro [34].

Un segmento o punto anatómico también puede alojarse en la parte superior del cuerpo, cercano a la posición de la cabeza, o en la parte inferior en la posición cercana a los pies. En consecuencia la cabeza esta en una posición superior al tronco y el tronco en un posición superior al muslo. En este segundo ejemplo el trocánter mayor esta localizado en la parte superior del fémur, mientras que el epicóndilo se sitúa en la parte inferior del humero [34].

La localización de un objeto o movimiento relativo al frente o a la espalda se denomina **anterior** y **posterior**. Así, el Bíceps Crural en la parte **anterior** del brazo y el tríceps lo hace en la parte **posterior** [34]. En resumen los descriptores anatómicos se encuentran ilustrados en la Figura 5.13 [21].

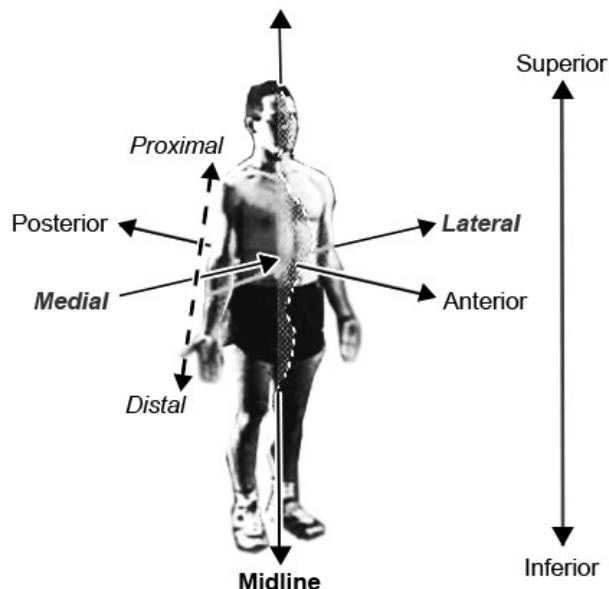


Figura 5.13: Términos anatómicos utilizados para describir una dirección. [34]

5.3.7. Planos y ejes del movimiento

Todos los posibles movimientos que puede realizar un cuerpo o sus segmentos se producen sobre tres planos imaginarios que se interseccionan de manera perpendicular en el centro de masas del cuerpo. El movimiento se producirá en uno o en varios planos específicos o en planos paralelos a éstos [34].

Los tres planos que tiene su origen en el centro de gravedad del cuerpo son el **plano sagital**, que divide el cuerpo en la parte derecha e izquierda; el **plano frontal**, que lo divide en adelante y atrás (anterior y posterior) y el **plano transversal** que lo divide en superior e inferior [34].

El movimiento siempre tiene lugar en estos planos o en planos paralelos sobre un **eje medio lateral** (plano sagital), **eje anteroposterior** (plano frontal) o **eje longitudinal** (plano transversal). Los planos y ejes de movimiento son reportados en la [Figura 5.14](#) [34].

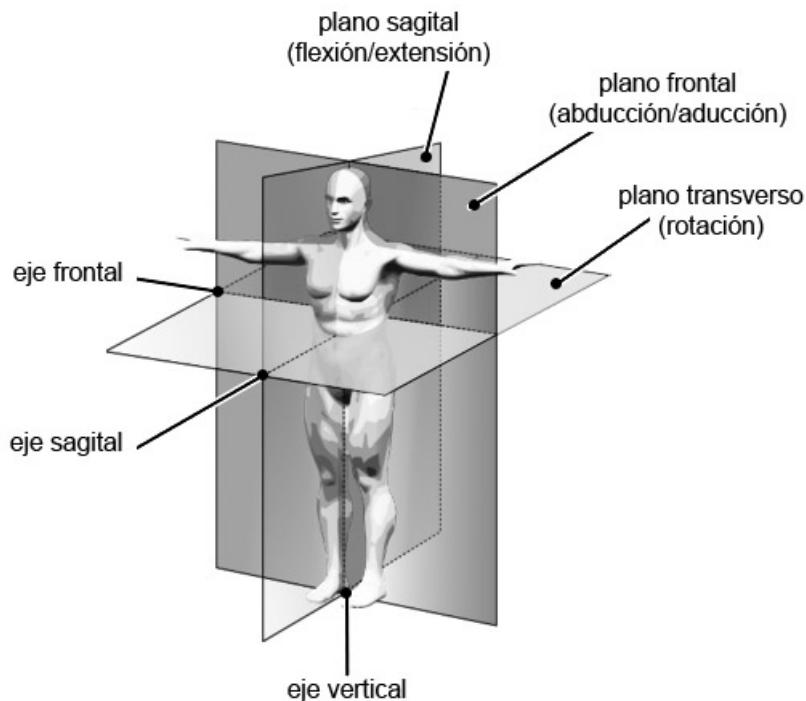


Figura 5.14: Intersección de los planos anatómicos [34].

Los cambios de posición (movimiento de translación) en el plano sagital sobre un eje articular son los referidos a los movimientos de **flexión y extensión**, como doblar el tronco adelante y atrás, el elevar o bajar las piernas; a su vez los movimientos de rotación en este plano sobre un eje que pasa por los centros de masas son, por ejemplo, los correspondientes a los saltos mortales adelante y atrás. Además, los movimientos en el plano sagital se pueden producir sobre un eje externo, por ejemplo a los volteos en una barra fija [34]. La visión precisa de este tipo de movimientos se realiza

en una posición perpendicular al plano de movimiento colocado en la misma dirección que el eje de movimiento [34].

En el plano frontal los movimientos que ocurren en este plano se producen sobre un eje anteroposterior. Al igual que en el plano sagital anteriormente mencionado, estos pueden ocurrir sobre un eje que pase por una articulación, por el centro del cuerpo localizado en su centro de masa. Los cambios de posición son los típicos movimientos referidos a la **abducción / aducción**, flexión lateral del tronco y la cabeza, movimientos de inversión y eversión del pie [34].

La visión precisa de los movimientos sobre un plano frontal se realiza de frente o detrás del cuerpo poniendo atención en el eje de rotación anteroposterior del movimiento [34].

En el último de los planos, los movimientos que se presentan son principalmente rotaciones que se producen en el eje longitudinal. Estos movimientos corresponden con las articulaciones de la cadera, hombro, columna vertebral y articulaciones del radio y ulnar [34].

Como no es posible establecer un enfoque de la visión con exactitud debido a que las observaciones óptimas son aéreas, por eso la observación se suele realizar siguiendo el punto lineal de un cuerpo [34].

Por otra parte si el movimiento del cuerpo humano se produjese en un solo plano, se parecería al **movimiento mecanizado de un robot (técnica perfecta)** [34].

5.3.8. Sistema biológico de estudio (sistema esquelético y sus articulaciones)

El sistema biológico de estudio (atleta) requiere un sistema complejo de elementos interrelacionados y en sinergia armónica para realizar el movimiento del cuerpo biológico, para poder estudiarlo básicamente se divide en dos sistemas el interno, constituido por sistema esquelético (esqueleto y articulaciones); y el sistema externo con los músculos.

El sistema esquelético confiere al cuerpo el soporte y las condiciones de rigidez necesarias para que se produzca el movimiento. Su componente principal es el hueso que se define como un tejido vivo y dinámico que se remodela constantemente bajo el control de factores hormonales y físicos. Dicho sistema funciona como un conjunto de palancas que transmiten la fuerza generada por los músculos y por tanto generando el movimiento corporal [34].

El esqueleto humano se define como el conjunto de 206 huesos que unidos mediante las articulaciones proporciona el soporte para el movimiento, funciona como compartimiento para el resto de tejidos y órganos blandos e incluso sirve como protector de los órganos vitales [34].

Las articulaciones son las estructuras anatómicas que tiene como propósito mantener conectados y unidos los huesos próximos mediante ligamentos y músculos. La dirección y el grado de movimiento dependen de las formas en las superficies de la articulación.

Existen dos formas de clasificar las articulaciones la primera de ella es la cantidad de ejes que posee (funcional) y su estructura (estructural).

Las clasificación funcional considera los planos en que realizan su movimiento y pueden ser:

1.- Monoaxiales: Representan aquella donde el movimiento angular se realiza en un solo eje. Un ejemplo es la articulación del codo.

2.- Biaxiales: Permite movimiento en dos ejes diferentes. Por ejemplo la articulación a la altura de la muñeca (radiocarpiana).

3.- Triaxial: En este tipo de articulaciones el movimiento se realiza en tres ejes de movimiento. Los ejemplos clásicos corresponden a la articulación del hombro y de la cadera.

4.- No axial: Esta ultima permite pequeños movimientos de deslizamiento (no axial). Ejemplos de esta es, la articulación formada entre los huesos carpianos y tarsianos de la muñeca y el pie.

5.4. Técnica deportiva

El 80 % de los deportes se caracterizan por patrones de movimiento que se ejecutan en las mismas condiciones, ejemplos de estos: el lanzamiento del disco o la jabalina, el salto al potro en gimnasia o la remada en el remo [47].

MATVEEV (1985) [49] define la técnica deportiva como el medio para liberar la lucha deportiva. WEINECK (1985) [49], describe la técnica como el conjunto de procesos desarrollados generalmente por la práctica para resolver racional y económico un problema motriz determinado. La técnica de una modalidad deportiva corresponde a un cierto motor ideal y que puede sufrir una modificación que corresponde a peculiaridades, constituyendo así el estilo personal.

Para GUTIÉRREZ (2001) [50], la técnica deportiva es el conjunto de **modelos biomecánicos**, anatómicos y funcionales que los movimientos tienen implícitos para ser realizado con la máxima eficiencia. ÁLVAREZ (2003) afirma que la técnica se puede definir como **la ejecución de movimientos estructurales** que obedecen a una serie de patrones **temporales y espaciales** [51].

La técnica deportiva se puede definir como **la ejecución de movimientos estructurales** que obedecen a una serie de **patrones temporales y espaciales** [14].

1. Se determina a partir de la estructura de un modelo funcional.
2. Solo puede ser aplicada por el atleta.
3. La persona que la realiza se relaciona con factores temporales y espaciales.
4. Tiene como finalidad la ejecución de estructuras funcionales.
5. La evaluación se hace a partir de la cantidad de errores que se realicen en su ejecución con respecto a la estructura modelo [14].

Existen en principio 2 grupos de técnica deportiva con características bien diferenciadas: **técnica regular y técnica variable**.

- **Grupo 1º. Técnica regular.** Caracteriza a los deportes que el ciclo o el encadenamiento de sus ciclos se realiza de forma constante y fija. Como la brazada en natación, la zancada en la carrera de atletismo, o los giros y piruetas en gimnasia. La acción motriz se caracteriza por no tener un adversario directo. La cadencia de la acción motriz de la técnica se realiza con un cierto ritmo más o menos constante y estereotipada [16]. La amplitud y la frecuencia son factores referenciales en este tipo de técnica de movimiento.
- **Grupo 2º. Técnica variable.** Pertenecientes a los deportes con un adversario directo u oponente. Corresponden a los deportes de colaboración/oposición, deportes de equipo) y adversario directo (deportes de combate). Son características de la Técnica en función del Factor Oposición [16].

1. Regulación o ajuste para solucionar el problema motriz mediante la técnica, debido a la presencia del adversario.
2. La situación y condiciones de la ejecución de la técnica es variable.
3. Es conveniente que la intencionalidad o el gesto en general de la técnica no sea revelado de antemano (excepto en la finta).
4. En los deportes de colaboración/oposición es necesario que la técnica sea supeditada al requerimiento táctico y estratégico [16].

En el plano práctico, para este grupo de deportes hablamos de habilidad técnica cuando se refiere a la posibilidad de aplicar la técnica aprendida (movimiento o sucesión de movimientos) de forma variable, sobre la base de las condiciones de situación de juego [16].

La técnica deportiva es un concepto nacido de la práctica de la actividad del juego. Los jugadores utilizan su coordinación motriz para llevar a cabo y conseguir el objetivo táctico y/o estratégico [16].

5.4.1. Técnica de remo

El remo como cualquier deporte que se practique requiere de una serie de pasos sistemáticos denominados **técnica**, para esta disciplina están identificadas 4 fases (ver [Tabla 5.2](#)):

- El ataque
- El pase
- El final
- La recuperación

En el remo como en otros deportes el resultado final es la combinación de los principios mecánicos, biomecánicos y fisiológicos, estos principios casi siempre van por caminos separados, pero el logro de un buen desempeño depende de la combinación de estos aspectos que darán como resultado la implementación de una técnica apropiada de remada.

La técnica correcta supone un aprendizaje continuo. Incluso después de años de experiencia los remeros de élite continúan esforzándose en perfeccionar su técnica con el propósito de bajar segundos en sus tiempos [17].

Cuadro 5.2: Técnica de remo [11].



El Ataque

- # Los brazos están totalmente estirados y relajados.
- # Las muñecas están planas.
- # Las piernas están flexionadas con las tibias verticales.
- # El cuerpo está pegado a las piernas.

El Pase

- # Los brazos están totalmente estirados y relajados.
- # Empuja las piernas atrás (abajo y echa el cuerpo hacia atrás)
- # Mantener los brazos rectos hasta que la empuñadura sobrepase las rodillas.
- # Tira de la empuñadura hasta el cuerpo, antebrazos horizontales y las muñecas fijas.
- # Tira los codos hasta que pasen el cuerpo/tronco.
- # El Pase está completado cuando retornas a la posición c Final.

El Final

- # Las piernas están estiradas.
- # La empuñadura va hasta el cuerpo y se mantiene.
- # El cuerpo queda ligeramente inclinado hacia atrás.
- # Los codos pasan el cuerpo. Los antebrazos se mantienen horizontales y las muñecas planas.
- # Los hombros quedan bajos y relajados.

La Recuperación

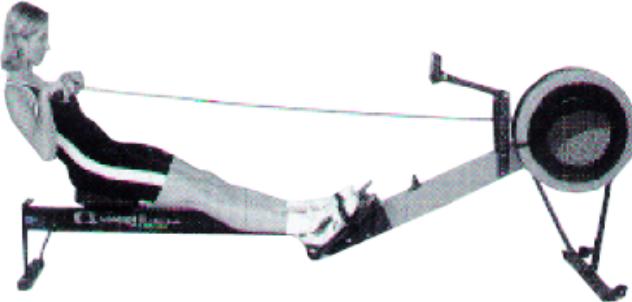
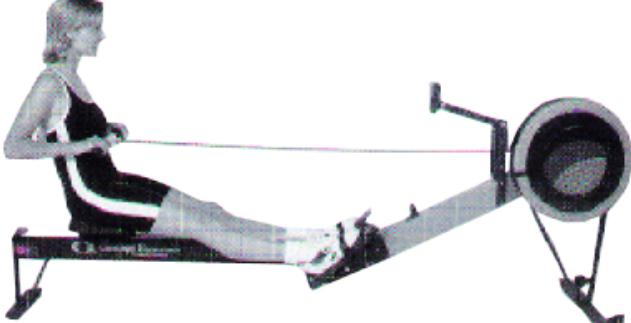
- # Comenzar con las piernas estiradas.
- # Extender los brazos hacia delante.
- # Mover el cuerpo/tronco desde las caderas cuando los brazos estén estirados.
- # Mover las piernas para que el asiento se deslice hacia delante sobre el monorail.
- # La posición de los brazos y del cuerpo/tronco se mantienen mientras te deslizas hacia delante.

Secuencia: manos, cuerpo, entonces deslizar.

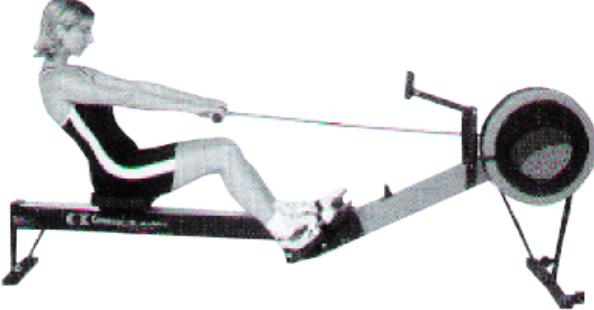
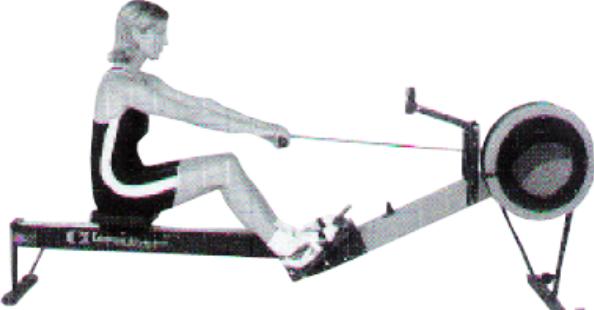
5.4.2. Fallos técnicos

Una técnica correcta es esencial para una remada eficiente y para disminuir el riesgo de las lesiones [11]. A continuación se muestra las fallas más comunes en la técnica con sus soluciones (ver Tabla 5.3, Tabla 5.4, Tabla 5.5 y Tabla 5.6).

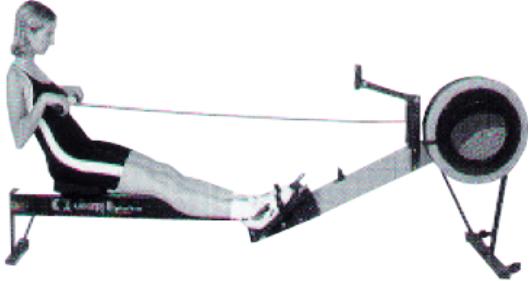
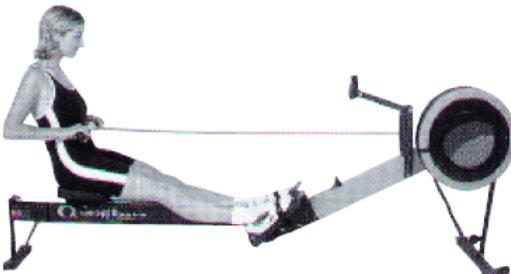
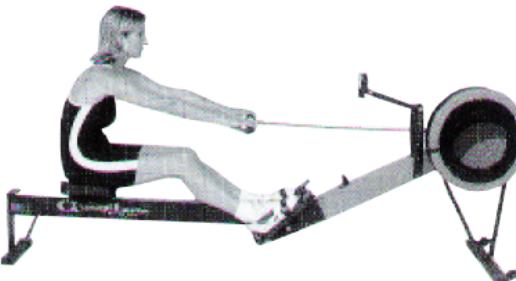
Cuadro 5.3: Fallas 1^a y 2^a en la ejecución de la técnica [11].

Fallo	Solución
1.- Tirar muy alto y tumbando demasiado.	  <p>a) Al Final de la palada, el remero tira de la empuñadura demasiado hacia arriba y tumba demasiado atrás. b) Tirar de la empuñadura hasta el cuerpo. Las muñecas deben ir rectas con los codos parejos pasando el cuerpo, antebrazos horizontales.</p>
2.- Deslizamiento creciente.	  <p>a) Las piernas empujan demasiado pronto, la espalda no está sujetada y por lo tanto la potencia no se transfiere a la empuñadura. b) Las piernas comienzan el pase y el cuerpo va hacia atrás con los brazos rectos transfiriendo la potencia de las piernas a la empuñadura.</p>

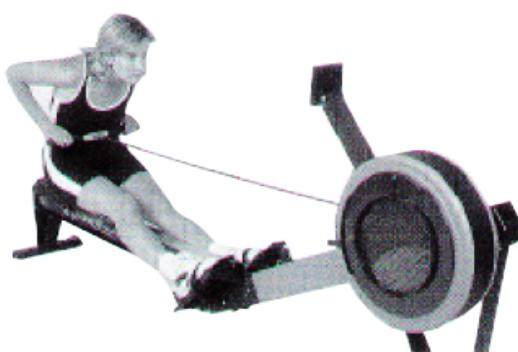
Cuadro 5.4: Fallas 3^a y 4^a en la ejecución de la técnica [11].

Fallo	Solución
3.- Utilizar la espalda demasiado pronto.	 <p>a) El remero comienza el Pase tirando la espalda hacia atrás más que empujando con las piernas. Esto resulta en un movimiento debilitado.</p>  <p>b) Las piernas empiezan el pase y el cuerpo va hacia atrás con los brazos totalmente extendidos y relajados.</p>
4.- Remar con los brazos flexionados.	 <p>a) El remero comienza el Pase tirando con los brazos más que empujando con las piernas.</p>  <p>b) El pase debe comenzar empujando con las piernas y sujetando la espalda con los brazos totalmente extendidos y relajados. Los brazos conectan las piernas y la espalda con la empuñadura.</p>

Cuadro 5.5: Fallas 5^a, 6^a y 7^a en la ejecución de la técnica [11].

Fallo	Solución
5.- Codos volantes.	 <p>a) Los codos del remero asoman hacia los lados del cuerpo en el Final.</p>  <p>b) Tirar de la empuñadura hasta el cuerpo. Las muñecas rectas con los codos parejos pasando el cuerpo, antebrazos horizontales.</p>
6.- Flexionar las muñecas.	 <p>a) Se puede ver al remero en varias etapas del Pase- Ataque, Pase y Final con las muñecas flexionadas.</p>  <p>b) Remar siempre con las muñecas rectas y vigilar las manos en cada etapa del pase.</p>
7.- Rodillas demasiado pronto.	 <p>a) En la Recuperación el remero se desliza hacia delante antes de que la empuñadura se haya extendido pasando las rodillas. Las manos golpean las rodillas o el remero eleva las manos para no golpear las rodillas.</p>  <p>b) Recordar la secuencia de la recuperación – manos, cuerpo, entonces deslizar. Después de haber extendido totalmente los brazos y el cuerpo se haya balanceado hacia delante, deslizarse hacia delante, manteniendo la posición de brazos y cuerpo.</p>

Cuadro 5.6: Falla 8^a, 9^a y 10^a en la ejecución de la técnica [11].

Fallo	Solución
8.- Sobre-extensión.	 <p>a) El cuerpo se estira demasiado hacia delante. Las tibias pueden pasar la vertical. La cabeza y los hombros tienden a agacharse hacia los pies. El cuerpo está en una posición débil para el Pase.</p>
9.- El cuerpo demasiado tenso. Agarrar la empuñadura demasiado fuerte.	 <p>b) Las tibias verticales. El cuerpo se junta a las piernas. Los brazos están totalmente extendidos y relajados, el cuerpo balancea ligeramente hacia delante. Esta posición te hará sentir cómodo.</p>
10.- Meter el cuerpo hacia la empuñadura.	 <p>a) Los dientes apretados, los hombros curvados y se agarra la empuñadura demasiado fuerte.</p>
	 <p>b) Relajar los hombros, sin apretar los dientes y relajar la mandíbula. Mantener un agarre ligero sobre la empuñadura.</p>
a) En el Final, el remero, en lugar de tirar de la empuñadura hacia el cuerpo se inclina hacia delante a la empuñadura.	 <p>b) En el final el remero se inclina hacia atrás ligeramente, mantiene las piernas abajo e iguala la empuñadura en el cuerpo utilizando la parte superior del cuerpo como una plataforma firme.</p>

5.5. Hardware

A continuación se presentan los componentes físicos utilizados y un resumen de cada uno:

5.5.1. Microcontrolador Atmega48.

Los microcontroladores son circuitos integrados que cuentan con una unidad de procesamiento central (CPU), dos memorias una para almacenar el programa y otra para almacenar datos, además de puertos entrada-salida (I/O). El funcionamiento de los microcontroladores está determinado por el programa almacenado en su memoria. Este puede escribirse en distintos lenguajes de programación como ensamblador, C ANSI y Basic. Pueden ser reprogramados. [57].

Los AVR son una familia de microcontroladores *RISC* (del inglés Reduced Instruction Set Computer, en español conjunto de instrucciones reducido) de Atmel. La arquitectura de los AVR fue concebida por 2 estudiantes en el Norwegian Institute of Technology, posteriormente fué refinada y desarrollada en Atmel Norway. El AVR es una CPU de arquitectura *Harvard* (arquitecturas de computadoras que utilizan dispositivos de almacenamiento físicamente separados para las instrucciones y los datos) . Tiene 32 registros de 8 bits. Algunas instrucciones sólo operan en un subconjunto de estos registros. La concatenación de los 32 registros, los registros de entrada/salida y la memoria de datos conforman un espacio de direcciones unificado, al cual se accede a través de operaciones de carga/almacenamiento. A diferencia de los microcontroladores PIC, el *stack* se ubica en este espacio de memoria unificado, y no está limitado a un tamaño fijo.

El AVR fue diseñado desde un comienzo para la ejecución eficiente de código C compilado. Como este lenguaje utiliza punteros para el manejo de variables en memoria, los 3 últimos pares de registros internos del procesador, son usados como punteros de 16 bits al espacio de memoria externa, bajo los nombres X, Y y Z. Los microcontroladores AVR tienen una tubería (*pipeline* en inglés) con dos etapas (cargar y ejecutar), que les permite ejecutar la mayoría en un ciclo de reloj, lo que los hace relativamente rápidos entre los microcontroladores de 8-bit [71].



Figura 5.15: Fotografía del Atmega 48

5.5.2. Giróscopo ITG-3200

El ITG-3200 se compone de 3 giróscopos independientes en cada eje de tecnología MEMS (acrónimo en inglés Micro Electro Mechanical Systems, en español Sistema Micro Electro Mecánico), los cuales detectan la velocidad de rotación en cada eje coordenado X (roll), Y (pitch) y Z (yaw). Cuando el sensor rota en cualquier sentido de los 3 ejes, el efecto de Coriolis (efecto que se observa en un sistema de referencia en rotación que consiste en la existencia de una aceleración relativa del cuerpo en dicho sistema en rotación) ocasiona una deflección que es detectada por un valor capacitivo. La señal resultante es amplificada, demodulada, y filtrada para producir un voltaje proporcional a la velocidad angular. Este voltaje es digitalizado utilizando un convertidor analógico digital de 16 bits (ADC) que muestrea cada eje.

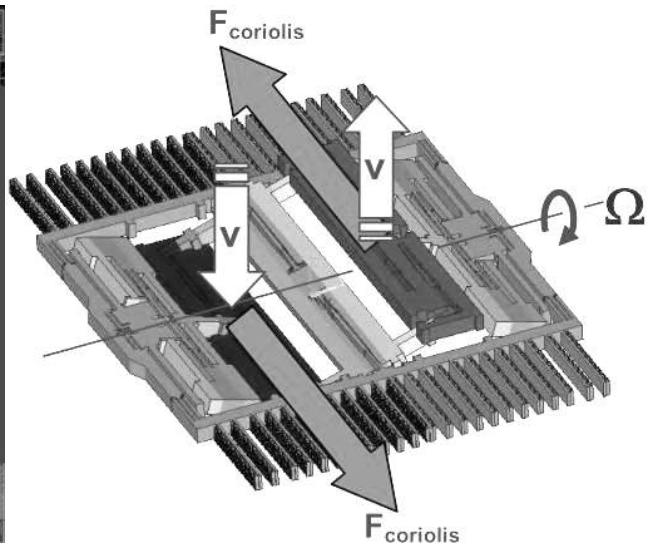
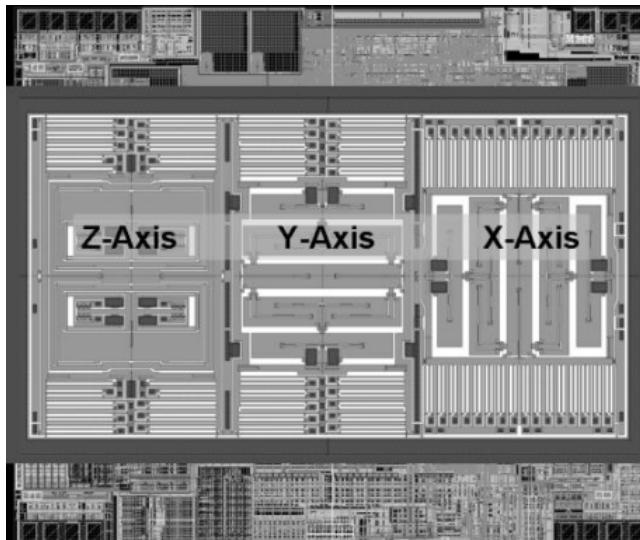


Figura 5.16: Fotografía interna del sensor (der.) Esquema de las fuerzas de coriolis (izq.) [83]

El rango completo de medición del sensor es de ± 2000 grados cada segundo ($^{\circ}/\text{s}$). La tasa de salida del ADC se puede programar en el rango de 3.9 hasta 8,000 cuentas cada segundo, además de contar con un filtro pasa bajas digital programable a frecuencias de corte determinadas por la hoja de especificaciones.

El ITG-3200 se comunica al microcontrolador utilizando la interface I^2C a una frecuencia de trabajo del puerto de 400 kHz., actuando como un dispositivo esclavo. El microcontrolador accesa a los registros internos del sensor utilizando el protocolo de comunicación (ver Figura 5.22) considerando que se conserva el último dato del giróscopo en sus registros, estos pueden ser leídos en cualquier momento, sin embargo las funciones de interrupción pueden ser utilizadas para determinar cuando hay un nuevo dato disponible.

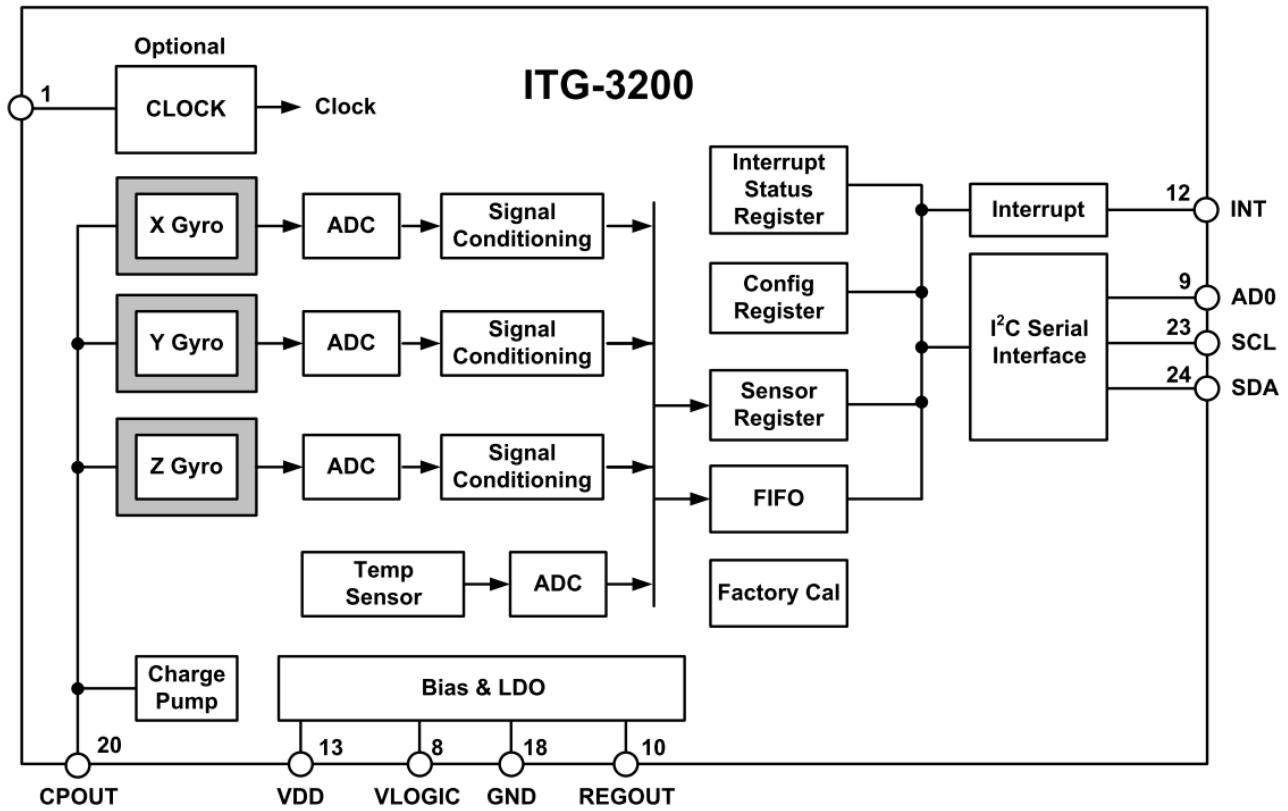


Figura 5.17: Diagrama a bloques funcional del giróscopo ITG-3200 [83]

De la Figura 5.17 se observan los principales bloques que componen al ITG-3200 que son:

- Giróscopos de 3-axis de tecnología MEMS con ADC de 16-bits individuales y acondicionadores de señal.
- Interface de comunicación serial I^2C
- Señal de reloj, cuenta con un esquema flexible permitiendo una variedad de señales de reloj internos y externos.
- Registros de datos, estos contienen el último dato del gyro y la temperatura. Son registros de solo lectura.
- Sistema de interrupciones
- Sensor de temperatura digital, utilizado para medir la temperatura actual del sensor.
- Bias y LDO, toman una tensión no regulada del VDD y generan una fuente interna estable así como las referencias requeridas por el sensor.
- Bomba de carga que genera 25V requerido por el oscilador interno del MEMS.

5.5.3. Acelerómetro ADXL-345

El ADXL-345 es un chip con acelerómetros de 3 ejes, capaz de realizar mediciones de la aceleración estática y dinámica en cada eje. Cuenta con una resolución de 13 bits en cada canal y un rango de $\pm 16g$. La salida digital tiene un formato de 16 bits complemento-2, utiliza la protocolo de comunicación SPI de 3 o 4 hilos e I^2C . Tiene una sensibilidad de 3.9mg/LSB, lo que permite hacer mediciones de inclinación menores a 1.0°.

El ADXL345 tiene implementado varias funciones especiales que detectan períodos de actividad e inactividad del sensor, presencia o falta de movimiento por comparación de la aceleración en cualquiera de los ejes con los umbrales definidos por el usuario. Detecta caída libre si el dispositivo está cayendo. Estas funciones se pueden asignar individualmente a cualquiera de los dos pines de salida de interrupción. Además cuenta con un sistema de gestión de memoria de 32 registros FIFO (first in, first out), este pila puede ser usada para almacenar datos y reducir al mínimo la actividad del microcontrolador anfitrión (*host*) y un menor consumo total de energía del sistema.

Principalmente se compone de una estructura micromecanizada suspendida sobre una oblea de silicio policristalino y capacitores diferenciales [69]. Un plato de cada capacitor es conectado a la estructura suspendida y en el otro plato está de forma independiente clavado. Así la desviación de la estructura cambia la distancia entre los platos del capacitor, modificando la capacitancia. Un circuito en el interior del *chip* mide la diferencia entre estas capacitancias y el resultado es una amplitud proporcional de la aceleración. Esta amplitud es convertida en una señal digital compatible con el protocolo I^2C .

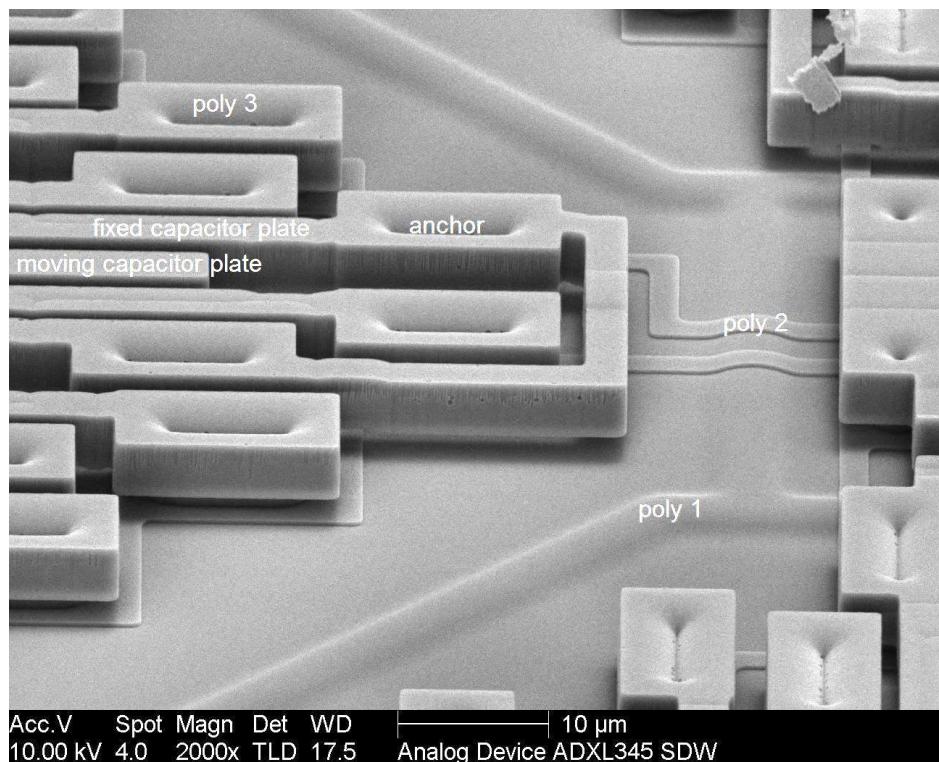
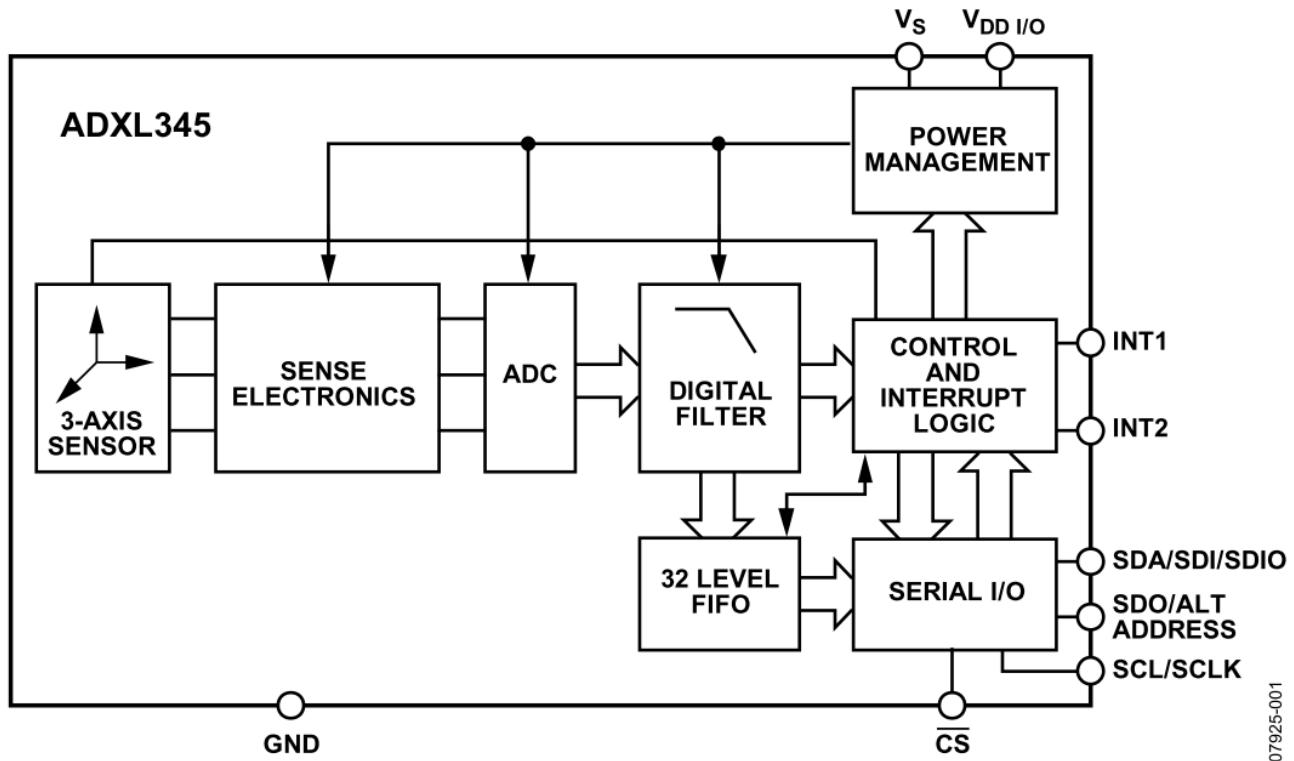


Figura 5.18: Fotografía interna del acelerómetro ADXL345 [94].



07925-001

Figura 5.19: Diagrama a bloques funcional del acelerómetro ADXL-345 [82]

Las principales características del ADXL-345:

- Consumo de energía: $23\mu A$, a 2.5V
- Selección del rango de medición por el usuario 2g,4g,8g,16g.
- Selección de la resolución de salida desde 10 bits hasta 16 bits.
- Sensibilidad del sensor de 3.9mg/LSB
- Pila FIFO de 32 registros
- Voltaje de alimentación de 2.0V a 3.6V
- Interfaces digitales SPI de 3 y 4 hilos e I^2C
- Temperatura de trabajo (-40°C a +85°C)
- Dimensiones del encapsulado: 3mm x 5mm x 1mm LGA
- El chip soporta choques de 10,000 g. antes de alcanzar la destrucción.
- Selección del ancho de banda por comandos seriales.

5.5.4. Módem Bluetooth SMiRF

Este módulo *SMiRF* (del inglés Serial Miniatura RF Link) desarrollado por la empresa Sparkfun puede conectarse con unidades Bluetooth. Este módem trabaja con el [Figura 5.5.4](#) protocolo estandard *RS-232-TTL*. Cuenta con velocidades de transmisión de 9600bps hasta 115200bps. El rango de alimentación DC es de 3.3V hasta 6V. Diseñado para liberar de conexiones eléctricas entre un microcontrolador compatible con comunicación serial y la USART (del ingles Universal Synchronous Asynchronous Receiver Transmitter) de la computadora.

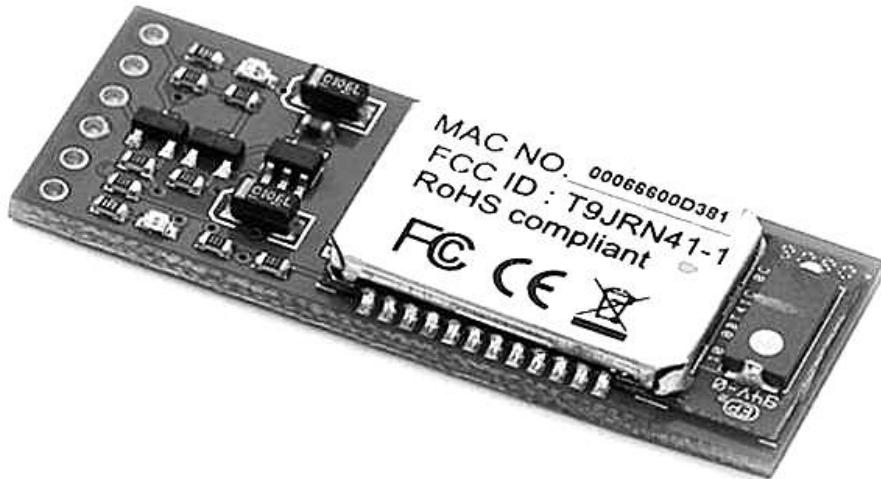


Figura 5.20: Tableta del módem Bluetooth [\[84\]](#)

Bluetooth es una especificación industrial para redes inalámbricas diseñado especialmente para dispositivos de bajo consumo, con una cobertura baja y basados en transceptores de bajo costo. Dado que determinados elementos se utilizan tanto para la transmisión como para la recepción, la comunicación que provee un transceptor solo puede ser semidúplex, lo que significa que pueden enviarse señales entre dos terminales en ambos sentidos, pero no simultáneamente.

El término transceptor se aplica a un dispositivo que realiza, dentro de una misma caja o chasis, funciones tanto de trasmisión como de recepción, utilizando componentes de circuito comunes para ambas funciones.

Los dispositivos Bluetooth pueden comunicarse entre ellos cuando se encuentran dentro de su alcance. Las comunicaciones se realizan por radiofrecuencia en la banda ISM (Industrial, Scientific and Medical) de los 2,4 GHz de forma que los dispositivos no tienen que estar alineados y pueden incluso estar en habitaciones separadas si la potencia de transmisión lo permite.

El nombre procede del rey danés y noruego HARALD BLÅTAND, cuya traducción al inglés sería HAROLD BLUETOOTH, conocido por buen comunicador y por unificar las tribus noruegas, suecas y danesas.

En la comunicación Bluetooth, un dispositivo debe implementar alguno de los perfiles del mismo. Estos definen el uso del canal, así como canalizar al dispositivo que se quiere vincular. Un perfil Bluetooth es la especificación de una interfaz de alto nivel para su uso entre dispositivos Bluetooth. Para utilizar una cierta tecnología Bluetooth un dispositivo deberá soportar ciertos perfiles.

Los perfiles son descripciones de comportamientos generales que los dispositivos pueden utilizar para comunicarse, formalizados para favorecer un uso unificado. La forma de utilizar las capacidades de Bluetooth se basa por tanto, en los perfiles que soporta cada dispositivo. Los perfiles permiten la manufactura de dispositivos que se adapten a sus necesidades.

Los perfiles han sido definidos y adoptados por *Bluetooth SIG* (Special Interest Group, o grupo de interés especial). Es una asociación privada sin ánimo de lucro con sede en Bellevue, Washington. En 1998, Ericsson, IBM, Intel, Toshiba y Nokia formaron un consorcio y adoptaron Bluetooth como nombre para su especificación. Los miembros del SIG dirigen el desarrollo de la tecnología inalámbrica Bluetooth, además de implementar y comercializar la tecnología en sus productos. El Bluetooth SIG por sí mismo no fabrica ni vende dispositivos Bluetooth. Cualquier compañía que incorpora la tecnología inalámbrica Bluetooth en sus productos para ofrecer bienes y servicios debe convertirse en un miembro de Bluetooth SIG [85].

Perfil SPP (Serial Port Profile)

Basado en la especificación 07.10 de *ETSI* (European Telecommunications Standards Institute o Instituto Europeo de Normas de Telecomunicaciones) por medio del protocolo RFCOMM (Radio Frequency Communication o comunicación por radio frecuencia). Emula una línea serie y provee una interfaz de reemplazo de comunicaciones basadas en RS-232, con las señales de control típicas. RFCOMM es a menudo denominado emulación de puertos serie. El puerto serie de Bluetooth está basado en este protocolo [87].

Un protocolo es un conjunto de reglas o estándares que dominan la sintaxis, semántica y sincronización de la comunicación entre dos o más dispositivos y/o computadoras. Los protocolos pueden ser implementados por hardware, software, o una combinación de ambos. A su más bajo nivel, un protocolo define el comportamiento de una conexión de hardware. Los protocolos permiten el flujo de información entre equipos que manejan lenguajes distintos [86].

5.6. Puertos de comunicación

Existen dos formas básicas de intercambiar información binaria: la paralela y la serial, la comunicación paralela transmite todos los bits de un dato de manera simultánea, por lo tanto la velocidad de transferencia es rápida, sin embargo tiene la desventaja de utilizar una gran cantidad de líneas, por lo tanto se refleja en el costo y tiene la desventaja de atenuarse a grandes distancias por la capacitancia entre los conductores [55].

Por lo que a continuación se describen los 2 puertos de comunicación utilizadas en este trabajo como alternativas al puerto paralelo:

5.6.1. Puerto serie RS-232

Es una interfaz física de comunicación en serie a través de la cual se transfiere información mandando o recibiendo un bit. Se utiliza para conectar las computadoras o microcontroladores a dispositivos como terminales, modems o sensores. El término "puerto serie" normalmente identifica el hardware conforme al estándar *RS-232*, diseñado para interactuar con un módem o con un dispositivo de comunicación similar. Los puertos serie existen actualmente en sistemas de automatización industrial y algunos productos industriales y de consumo [55].

El puerto serie *RS-232* (también conocido como COM) del tipo asincrónico, utiliza cableado simple desde 3 hilos y conecta computadoras o microcontroladores a todo tipo de periféricos que sean compatibles con la norma.

En el equipo de cómputo la interfaz entre el estándar *RS-232* y el microprocesador generalmente se realiza mediante una USART (acrónimo en inglés Universal Synchronous Asynchronous Receiver-Transmitter, en español Transmisor-Receptor Síncrono Asíncrono Universal) se diseñó para convertir las señales que maneja la CPU y transmitirlas al exterior. La mayoría de las computadoras construidas después del año 2000 utilizan el chip USART 16550, que soporta velocidades de transmisión de hasta 921.6 kbps (kilobits cada segundo). Las principales funciones de la USART son manejar las interrupciones de los dispositivos conectados al puerto serie y convertir los datos en formato paralelo, transmitidos al puerto del sistema a datos en formato serie, para que puedan ser transmitidos a través de los puertos y viceversa.

La típica transmisión *start-stop* es la que se usa en la transmisión de códigos ASCII (acrónimo inglés de *American Standard Code for Information Interchange* o en español Código Americano Estándar para el Intercambio de Información) a través del puerto *RS-232*.

5.6.1.1. Protocolo de comunicación RS-232 Asíncrona:

1. Se envía una señal inicial ***start bit*** anterior a cada byte, carácter o palabra codificada.
2. Una vez enviado el código correspondiente se envía inmediatamente una señal de ***stop*** después de cada palabra codificada.

3. La señal de inicio (***start bit***) sirve para preparar al mecanismo de recepción, la llegada y registro de un símbolo, y la señal de parada (***stop bit***) sirve para predisponer al mecanismo de recepción para que tome un descanso y se prepare para la recepción del nuevo símbolo.

Las transacciones en el puerto *RS-232* tienen este formato:

| *start bit* | 0 1 2 3 4 5 6 7 | *parity bit* | *stop bit* |

5.6.2. Puerto serie I^2C

Es un puerto de comunicaciones en serie. (acrónimo en inglés *Inter-Integrated Circuit* o en español Circuitos Inter-Integrados). La versión 1.0 data del año 1992 y la versión 2.1 del año 2000, diseñada por la empresa Philips. La velocidad es de 100Kbits/s y 400Kbits/s en el modo estándar, aunque también permite velocidades de 3.4 Mbit/s. Utilizado para propósitos industriales, principalmente para comunicar microcontroladores y sus periféricos en sistemas integrados (*Embedded Systems*) que normalmente residen en la misma placa de circuito impreso [56].

La principal característica de I^2C es que utiliza 2 líneas para transmitir la información: una para los datos y por otra la señal de reloj. Es necesaria una línea para la referencia o masa. Como suelen comunicarse circuitos en una misma placa que comparten una misma masa o tierra, esta tercera línea no suele ser necesaria. Las líneas se llaman: **SDA** (acrónimo en inglés de *Serial Data* o datos seriales), **SCL** (acrónimo en inglés de *Serial Clock* o en español señal de reloj), **GND** (acrónimo en inglés de *Ground*, en español referencia o tierra) ver [Figura 5.21](#). Las 2 primeras líneas son drenador abierto, por lo que necesitan resistencias de *pull-up*, estas resistencias se conectan a la señal **VCC**.

Los dispositivos conectados al puerto I^2C tienen una dirección única para cada uno. También pueden ser maestros o esclavos. El dispositivo maestro inicia la transferencia de datos y además genera la señal de reloj, pero no es necesario que el maestro sea siempre el mismo dispositivo, esta característica se la pueden ir pasando los dispositivos que tengan esa capacidad por lo que al puerto I^2C se le denomina puerto multimaestro.

Las transacciones en el puerto I^2C tienen este formato:

| *start* | A7 A6 A5 A4 A3 A2 A1 | A0(R/W) | ACK | ... DATA ... | ACK | *stop* | *idle* |

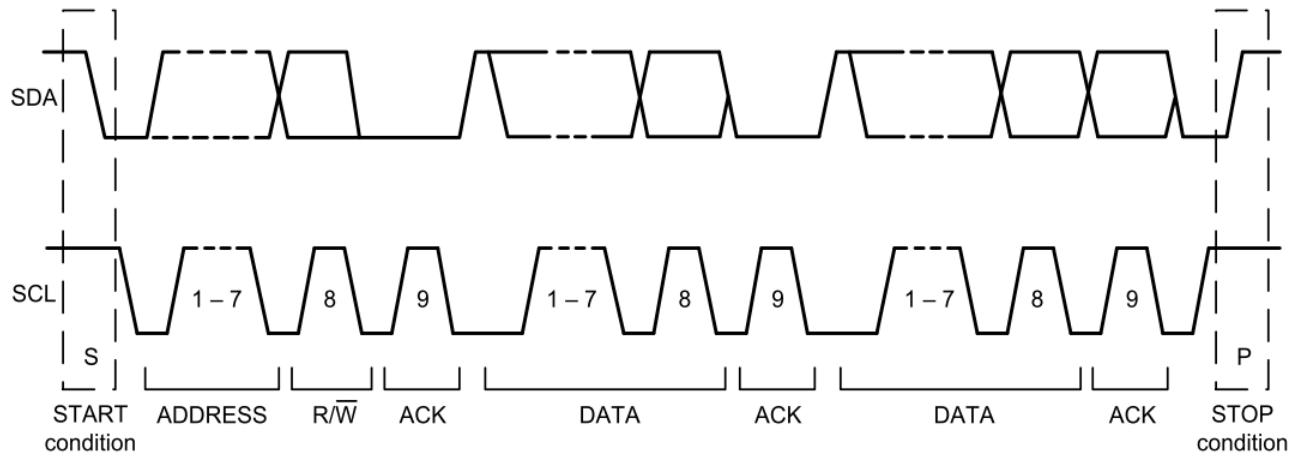


Figura 5.21: Esquema de transmisión I^2C

5.6.2.1. Protocolo de comunicación I^2C :

1. El maestro comienza la comunicación enviando un patrón llamado ***start condition***. Esto alerta a los dispositivos esclavos, poniéndolos a la espera de una transacción.
2. El maestro se dirige al dispositivo con el que quiere hablar, enviando un byte que contiene los siete bits (A7-A1) que componen la dirección del dispositivo esclavo con el que se quiere comunicar, y el octavo bit (A0) de menor peso corresponde a la operación (***Read/Write***), lectura=1 (recibir dato del esclavo) y escritura=0 (enviar dato al esclavo).
3. La dirección enviada es comparada por cada esclavo del puerto con su propia dirección, si ambas coinciden, el esclavo se considera direccionado como esclavo-transmisor o esclavo-receptor dependiendo del bit ***R/W***.
4. El esclavo responde enviando un bit de ***ACK*** que le indica al dispositivo maestro que el esclavo reconoce la solicitud y está en condiciones de comunicarse.
5. Seguidamente comienza el intercambio de información entre los dispositivos.
6. El maestro envía la dirección del registro interno del dispositivo que se desea leer o escribir.
7. El esclavo responde con otro bit de ***ACK***
8. Ahora el maestro puede empezar a leer o escribir bytes de datos. Todos los bytes de datos deben constar de 8 bits, el número máximo de bytes que pueden ser enviados en una transmisión no está restringido, siendo el esclavo quien fija esta cantidad de acuerdo a sus características.
9. Cada byte leído/escrito por el maestro debe ser obligatoriamente reconocido por un bit de ***ACK*** por el dispositivo maestro/esclavo.
10. Se repiten los 2 pasos anteriores hasta finalizar la comunicación entre maestro y esclavo.

11. Aun cuando el maestro siempre controla el estado de la línea del reloj, un esclavo de baja velocidad o que deba detener la transferencia de datos mientras efectúa otra función, puede forzar la línea **SCL** a nivel bajo. Esto hace que el maestro entre en un estado de espera, durante el cual, no transmite información esperando a que el esclavo esté listo para continuar la transferencia en el punto donde había sido detenida.
12. Cuando la comunicación finaliza, el maestro transmite la señal de **stop condition** para dejar libre el puerto.
13. Después de la señal de **stop condition**, es obligatorio para el puerto estar desocupado (*idle*) durante unos micro segundos.

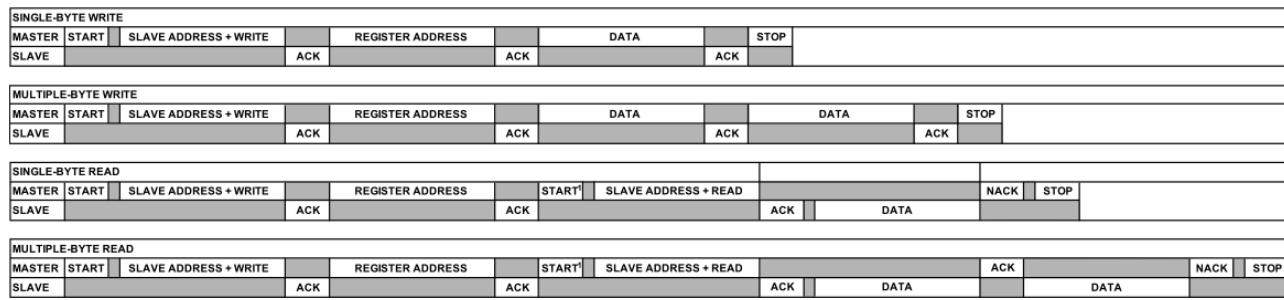


Figura 5.22: Diferentes modos de operación del protocolo de comunicación *I²C*

5.7. Circuito de alimentación

El circuito de alimentación del sistema de medición inercial está formado por una batería recargable y un circuito que recarga dicha batería. La batería fabricada de Polímero de Litio (Li-Po) trabaja con 3.7 Volts a 700mAh, sus dimensiones son 5.8 x 34 x 47 mm, tiene una masa de 22g [80].



Figura 5.23: Batería de Polímero de Litio (Li-Po)

Para cargar la batería anterior se utiliza el circuito Integrado MAX1555, que está diseñado para cargar una celda de Ión-Litio o Polímero de Litio (Li-Po) desde una fuente con un rango de 3.7 a 7 Volts DC. Incluye un *pin* de salida para indicar el estado de carga de la batería. Incluye un modulo de alta impedancia que se activa cuando la batería esta completamente cargada y envía una señal de control para interrumpir el proceso de recarga. [81].

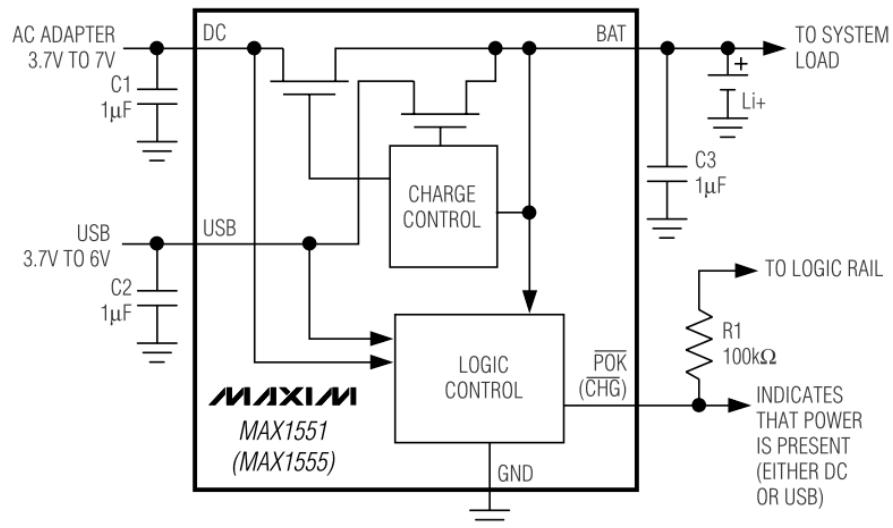


Figura 5.24: Circuito eléctrico de conexión del MAX1555 [81]

5.8. Software

A continuación se presentan los programas de cómputo utilizados y un resumen de las características propias de cada uno:

5.8.1. Eagle

Eagle es un editor de esquemas electrónicos, con herramientas para el diseño y desarrollo de tarjetas de circuito impreso *PCB* (acrónimo en inglés *Printed Circuit Board*). **EAGLE** es el acrónimo de *Easily Applicable Graphical Layout Editor* [74]. El programa consta de 3 módulos, un Diagramador, un Editor de esquemas y un Ruteador de pistas en un *IDE* (del inglés *Integrated Development Environment* o en español Entorno Todo Integrado) por lo que no hay necesidad de convertir entre esquemas y diseños.

5.8.2. Python

Python es un lenguaje de programación multiplataforma con amplio soporte para **programación orientada a objetos** creado por GUIDO VAN ROSSUM a principios de 1990 [75]. Este lenguaje se caracteriza por ser **semi-interpretado**, se ejecuta utilizando un programa intermedio llamado intérprete en lugar de compilar el código a lenguaje de máquina. Esto permite que el lenguaje sea flexible y portable. El código fuente se traduce a un pseudo código máquina intermedio llamado *bytecode* (fichero binario producido por el compilador mas abstracto que el código máquina) la primera vez que se ejecuta, generando archivos **.pyc* o **.pyo*. No es necesario especificar el tipo de dato que se va a almacenar en una variable (**tipado dinámico**), sino que su tipo se determinara en el momento de ejecución de acuerdo al tipo de dato que se le asigne. Además, el tipo de variable puede cambiar si se le asigna otro valor. No se puede tratar a una variable de forma distinta al valor que se ha almacenado en ella (**fuertemente tipado**). En caso que sea necesario, la conversión debe realizarse de manera explícita.

5.8.3. L_YX

L_YX es un sistema de preparación de documentos diseñado para crear artículos técnicos y científicos con matemáticas, referencias cruzadas, bibliografías, índices; pensado para redactar documentos extensos en los que se requieren las capacidades de procesamiento usuales: paginación y división automática de secciones, corrección ortográfica. La filosofía de L_YX considera especificar *lo* que se está haciendo, no *cómo* hacerlo. En lugar de “*lo que ves es lo que obtienes*” (*WYSIWIG*, del inglés *What You See Is What You Get*), el modelo de L_YX es “*lo que ves es lo que quieras decir*” (*WYSIWIM*, del inglés *What You See Is What You Mean*). Es una idea que simplifica los mecanismos de la escritura de documentos ya que el autor únicamente se enfoca a realizar la redacción de la información dejando el formato final a L_YX según las instrucciones indicadas por el usuario. [76].

5.8.4. Matlab

Matlab es la abreviatura de *MATrix LABoratory* "laboratorio de matrices" es un software matemático que ofrece un entorno de desarrollo integrado *IDE* (del inglés *Integrated Development Environment*) con un lenguaje de programación propio (lenguaje M), es un lenguaje multiplataforma. Entre sus funciones básicas están: la manipulación de matrices, la representación de datos y funciones, la implementación de algoritmos, la creación de interfaces de usuario *GUI* (acrónimo en inglés *Graphical User Interface*). [77].

5.8.5. MikroC Pro for AVR

Es un entorno de desarrollo integrado para generar códigos y archivos *.hex y ser programados posteriormente en microcontroladores proporcionando la flexibilidad de usar un minicompilador cuya forma de programación consiste en instrucciones de alto nivel "C++" [78].

5.8.6. Panda 3D

Panda3D es un motor gráfico de videojuegos que integra imágenes, audio, E/S, detección de colisiones para la creación de juegos en 3D. Es un proyecto de código abierto y software libre, bajo la licencia *BSD* (acrónimo en inglés de *Berkeley Software Distribution*) revisada. El lenguaje de programación de video juegos para el que fue destinado *Panda3D* es **Python**. Este motor está escrito en **C++** y utiliza un generador-empaquetador automático para exponer la completa funcionalidad del motor en una interfaz de *Python*. Este enfoque da al programador las ventajas del desarrollo rápido en *Python* y la gestión avanzada de memoria, manteniendo el rendimiento de un lenguaje compilado en el núcleo del motor. Ejemplo de ello es que el motor está integrado con el recolector de basura de *Python* y las estructuras del motor son manejadas automáticamente [76].

5.8.7. Blender

Blender es un *software* de aplicación multiplataforma (compatible con varios sistemas operativos), dedicado al **modelado, animación y creación de gráficos tridimensionales**. Puede usarse para crear visualizaciones 3D, tanto imágenes estáticas como vídeos de alta calidad, mientras que la incorporación de un motor 3D en tiempo real permite la creación de contenido interactivo que puede ser reproducido independientemente. Es compatible con todas las versiones de *Windows*, *Mac OS X*, *Linux*, *Solaris*, *FreeBSD* e *IRIX* [70]. Se desarrolla como '**Software Libre**', con el código fuente disponible bajo la licencia *GNU GPL*. Por medio de su arquitectura abierta, ofrece interoperabilidad entre plataformas, extensibilidad y un flujo de trabajo altamente integrado [73].

Capítulo 6

Desarrollo experimental

6.1. Modelo biónico

El modelo biónico estudia el comportamiento cinemático puntual del atleta de remo bajo techo. La deducción del modelo corresponde a la interpretación de la anatomía (estructura interna del cuerpo biológico utilizando cinemática puntual). La metodología propuesta está sustentada en 3 campos generales de la ciencia: la **física** con la definición de propiedades y la interpretación de resultados; la **matemática** que proporciona herramientas geométricas abstractas, métodos y algoritmos de solución; finalmente la **biología** que añade parámetros específicos de los modelos de sistemas biológicos.

La aplicación de la metodología empleada consiste de los siguientes pasos:

1. **La asignación de una posición inicial de estudio del cuerpo biológico.**

Se propone la posición anatómica como se observa en la (ver [Figura 5.12](#)).

2. **Definir la sección de estudio y los segmentos corporales.**

La sección de estudio se limita a la parte superior del cuerpo del atleta: los **brazos** y la **columna** considerando la **cabeza**.

3. **Identificar las articulaciones de cada segmento corporal, los ejes axiales y los grados de libertad totales para el estudio cinemático.**

Para comprender a detalle el comportamiento cinemático de la sección de estudio, se requiere conocer las estructuras fundamentales “**articulaciones**”, asignarles eje axiales y definir los grados de libertad totales del sistema relacionados con las mismas.

a) La identificación de las articulaciones representativas

De los tres segmentos corporales brazos (izquierdo y derecho), columna y cabeza; se puede simplificar la descripción de los brazos, considerando que cada uno de estos segmentos es simétrico al plano sagital y se propone unificar la columna con la cabeza para establecer una cadena cinemática. Por lo que se tiene:

- 1) El **brazo** se compone por **3 uniones o articulaciones: hombro, codo y muñeca**.
- 2) La **columna** se compone de **33 articulaciones más la cabeza**: las articulaciones de las vértebras son semejantes lo que permite estudiar una sola como unidad funcional, además se considera a la cabeza como una vertebra más.

b) Descripción de los ejes axiales por articulación

La descripción cinemática de las articulaciones en cada segmento corporal requiere la asignación de un marco coordenado, cuando es en un plano este se clasifica como monoaxial, en 2 planos biaxial y para 3 planos triaxial [34].

- 1) En el brazo los ejes de las articulaciones están asignadas de la siguiente forma:
 - a'* Hombro: Es una articulación triaxial considerada como una articulación esférica y diartrósica.
 - b'* Codo: Es considerado como una articulación monoaxial.
 - c'* Muñeca: es una articulación biaxial o triaxial.
- 2) En la columna los ejes de las articulaciones son fijados considerando una vertebra:
 - a'* La columna está formada por las articulaciones del tipo anfiatrósicas (articulación con movimientos muy limitados constituida por superficies unidas por discos de fibrocartílago) triaxiales.

c) Descripción de los grados de libertad por articulación

Aunque se conoce el numero de planos necesarios para referir el movimiento en cada articulación, no es suficiente, para describir directamente el cambio de la posición en la estructura, explicar este fenómeno es posible con el uso del concepto Grado de libertad GDL o DOF (acrónimo en inglés Degree Of Liberty) con el que se determina un número asociado con los planos de referencias axiales y los nombres de los desplazamientos que se realizan en cada uno de ellos [34].

1) El brazo posee 7 GDL repartidos de la siguiente manera:

- a' Hombro: Contiene 3 GDL , los cambios que realiza en cada plano son: flexión, extensión, abducción, aducción y circundicción.
- b' Codo: Contiene 1 GDL directo, los cambios que realiza en cada plano son: Flexión-Extensión y Pronación- Supinación (este desplazamiento se considera propio del segmento por eso mismo no se considera como un GDL).
- c' Muñeca: Se consideran 3 GDL, los cambios que realiza en cada plano y por parejas son: Flexión-Extensión, Abducción- Aducción y Circundicción.

2) La columna tiene 102 GDL repartidos de la siguiente manera:

- a' Vertebra: Contiene 3 GDL por cada una de las 34 sumando la cabeza, formando la columna

Considerando la información básica detallada en la descripción de grados de libertad, se determina que **la sección de estudio se compone de un total de 116 GDL** distribuidos de la siguiente forma: **102 GDL en la columna vertebral y 7 GDL en cada brazo** respectivamente.

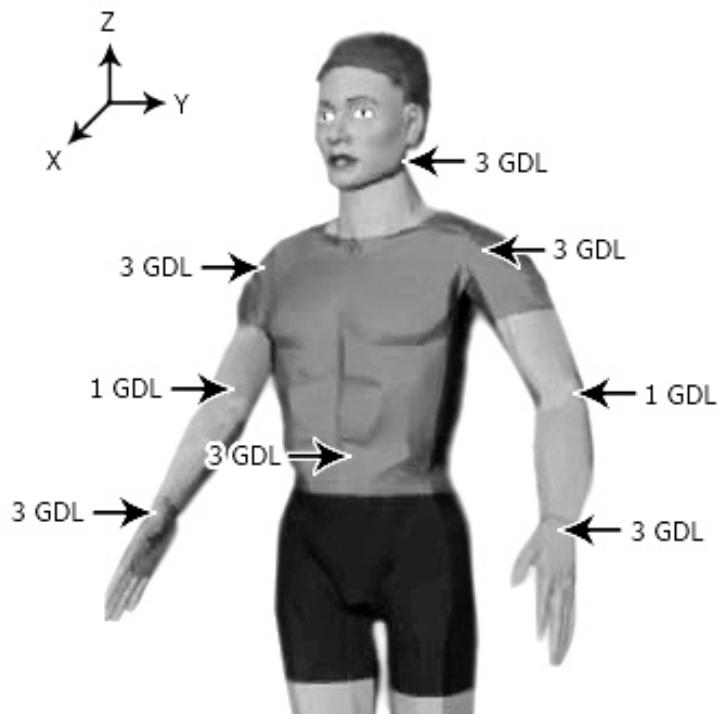


Figura 6.1: Esquema del atleta detallando la sección de estudio

4. Bases del análisis cinemático de la sección de estudio

Tiene como función establecer los grados de libertad a usar en este desarrollo con respecto a los reportados en el último párrafo de la identificación, la selección del algoritmo matemático considerando la esencia del cuerpo de análisis y determinando las condiciones mecánicas del mismo.

a) Definición de los grados de libertad para el presente trabajo

De los 116 GDL totales del sistema reportados en la identificación de las articulaciones, para este estudio se consideran **exclusivamente 15 GDL totales** repartidos de la siguiente forma: 5 GDL para la columna vertebral contando la cabeza y 5 GDL de cada brazo respectivamente.

b) Selección del algoritmo matemático para representar la cinemática del modelo

El sistema biológico puede representarse como un conjunto de cadenas cinemáticas abiertas^[89] y deformaciones oseas mínimas, el algoritmo que se adapta a la naturaleza de dichas cadenas es el propuesto por DENAVIT-HARTENBERG [41].

c) Condiciones mecánicas y de movimiento del cuerpo proporcionadas por el sistema consideran:

- 1) *Los movimientos en las articulaciones son rotacionales.*
- 2) *Las rotaciones en las articulaciones producen movimientos de traslación en las sucesivas articulaciones, debido a la configuración geométrico de los huesos.*
- 3) *Considera el cambio que sufre la estructura al realizarse el movimiento considerandolo cero (deformación de los huesos).*
- 4) *Corresponde a crecimiento de la estructura se considera un escalamiento de uno (aumento de la longitud del hueso).*

5. Desarrollo matemático con el algoritmo de DENAVIT-HARTENBERG y obtención del modelo matemático

La descripción cinemática del atleta usando el algoritmo de DENAVIT-HARTENBERG requiere la construcción de un esquema que establezca una analogía atleta - robot representado los movimientos rotacionales con cilindros y los movimientos traslacionales con primas rectangulares.

Los movimientos descritos por los robots se componen de rotaciones y traslaciones sin embargo el cuerpo humano solo realiza movimientos rotacionales es por ello que el diagrama resultante corresponde a cilindros (ver figura Figura 6.2).

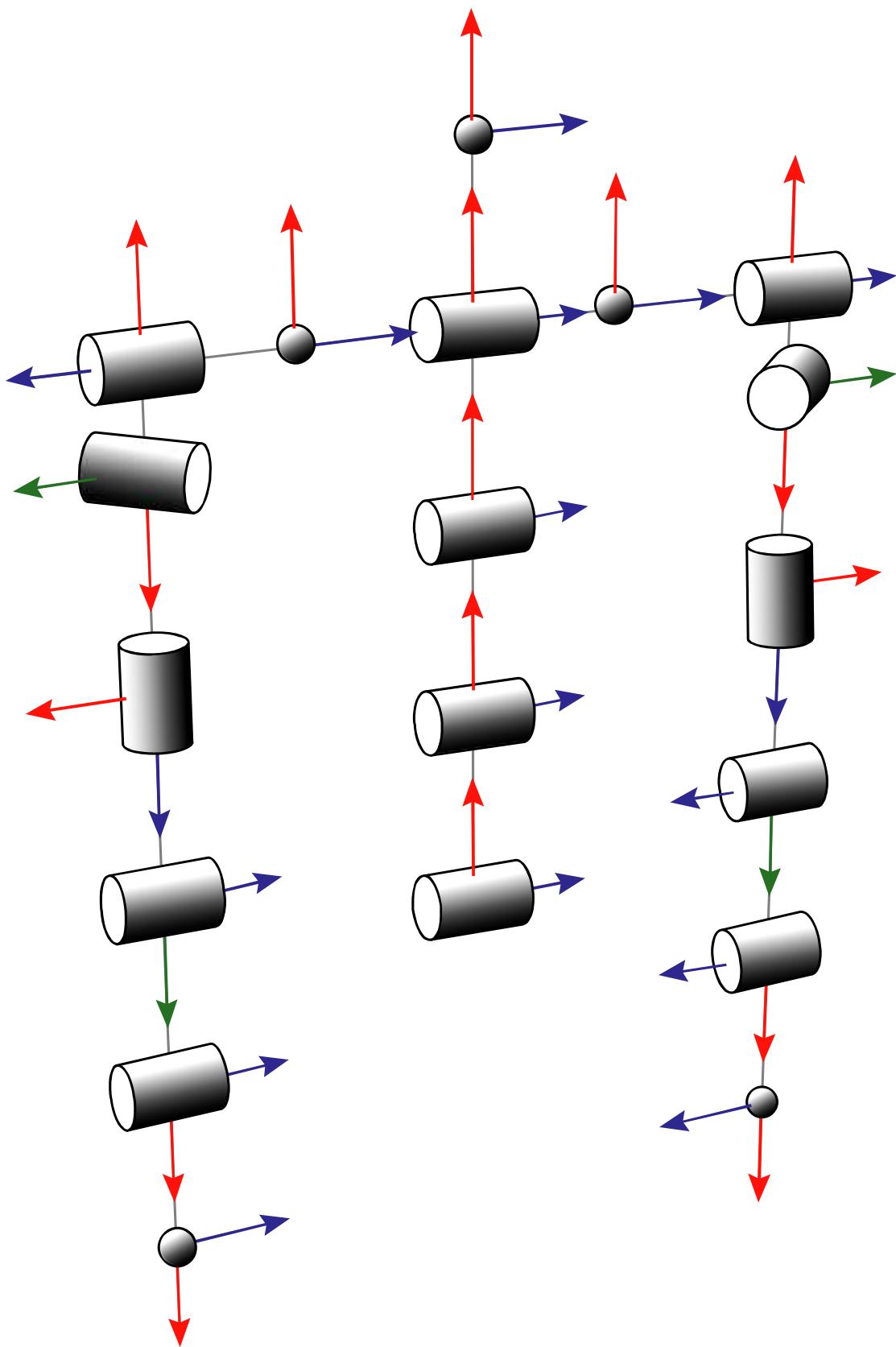
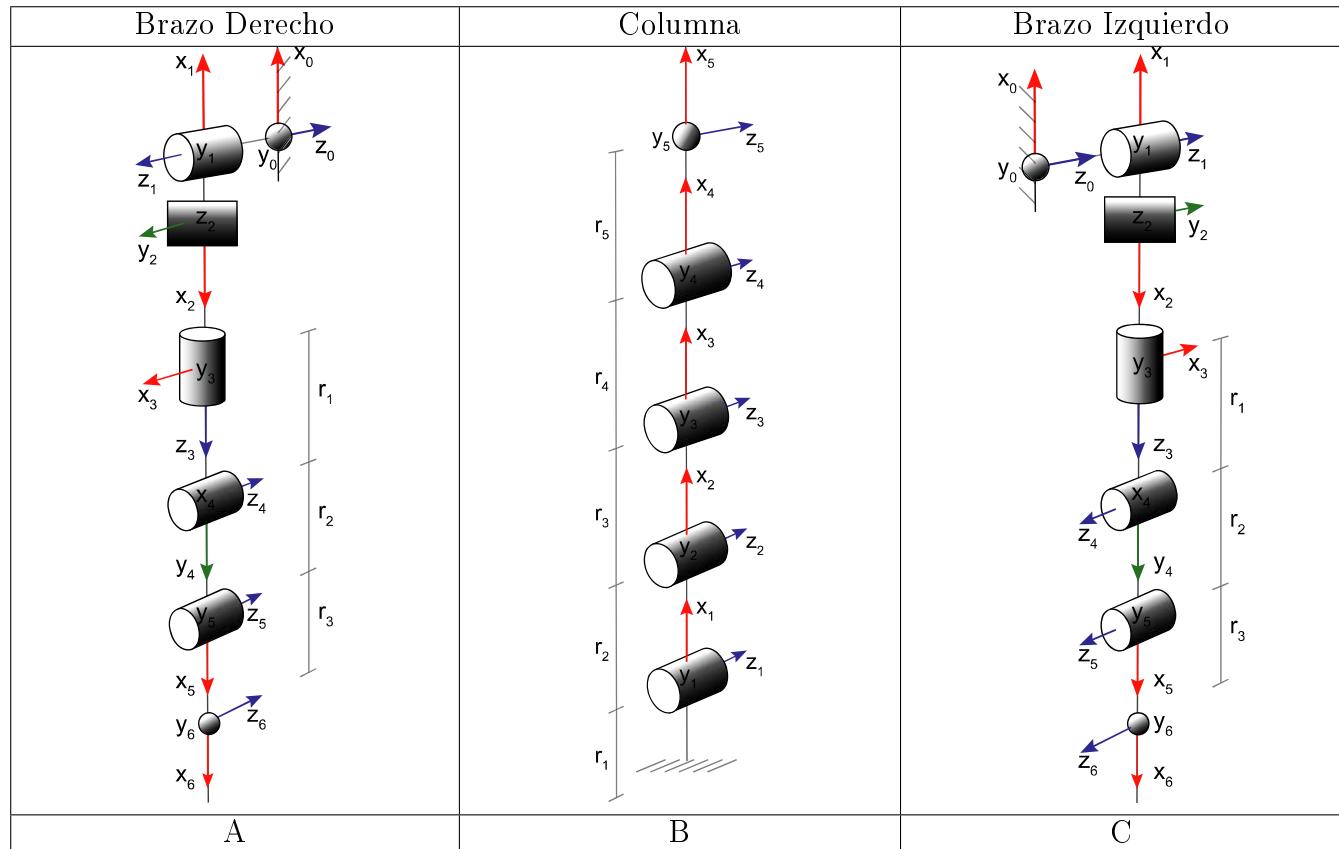


Figura 6.2: Robot general del atleta de remo bajo techo

De la información obtenida en la identificación y la representación en diagramas robóticos anterior (ver figura [Figura 6.2](#)) se observa que el cuerpo biológico contiene un robot general compuesto de 2 robots parciales que se anclan en la cadera terminando en la mano derecha y la mano izquierda respectivamente.

El punto de análisis en esta propuesta se localiza en la muñeca por lo que describir la cinemática del robot completo es innecesario, por ello se procede a separar el robot general en 3 nuevos robots independientes a los que posteriormente se les aplica el algoritmo de DENAVIT-HARTENBERG (ver [Tabla 6.1](#)) [61], las condiciones con las que se realiza ese desacople de robots se tomaron en cuenta de las enunciadas por ROCON en su trabajo “el comportamiento mecánico del brazo es independiente del resto de cuerpo” [61].

Cuadro 6.1: Desacople del robot general en A, B Y C



Resultado del desacople de robots anterior se reporta en la tabla anterior, con el robot B correspondiente a la columna vertebral que es la sección del esqueleto que se encarga de sostener la estructura y fijar los movimientos, el robot C en el brazo izquierdo por el sentido natural de la ubicación del eje de análisis de la columna y luego entonces el robot A consiste en el brazo derecho.

A continuación se desarrolla el algoritmo de Denavit-Hartenberg primeramente para el Robot B, en segundo lugar para el Robot C y finalmente el Robot A

- **Robot (B) Columna**

Del diagrama robótico B en la [Tabla 6.1](#) se obtienen los siguientes parámetros de Denavit-Hartenberg

Cuadro 6.2: Tabla de Parámetros Denavit-Hartenberg para la columna (B)

Eslabones	z_i		x_i	
	ϑ_i	d_i	a_i	α_i
1	0	0	r1	0
2	q1	0	r2	0
3	q2	0	r3	0
4	q3	0	r4	0
5	q4	0	r5	0

usando las ecuaciones [Ecuación 5.51](#) y [Ecuación 5.54](#) para cada elemento del robot (columna) se tiene que:

Matriz de transformación homogénea de la cadera a la 1^a vértebra:

$$A_1^0 = \left[\begin{array}{ccc|c} \cos \theta_1 & -\sin \theta_1 & 0 & 0 \\ \sin \theta_1 & \cos \theta_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ \hline 0 & 0 & 0 & 1 \end{array} \right] \left[\begin{array}{ccc|c} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_1 \\ \hline 0 & 0 & 0 & 1 \end{array} \right] \left[\begin{array}{ccc|c} 1 & 0 & 0 & a_1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ \hline 0 & 0 & 0 & 1 \end{array} \right] \left[\begin{array}{ccc|c} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha_1 & -\sin \alpha_1 & 0 \\ 0 & \sin \alpha_1 & \cos \alpha_1 & 0 \\ \hline 0 & 0 & 0 & 1 \end{array} \right]$$

$$A_1^0 = \left[\begin{array}{ccc|c} 1 & 0 & 0 & r_1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ \hline 0 & 0 & 0 & 1 \end{array} \right] \quad (6.1)$$

Matriz de transformación homogénea de la primera vértebra a la 2^a vértebra:

$$A_2^1 = \left[\begin{array}{ccc|c} \cos \theta_2 & -\sin \theta_2 & 0 & 0 \\ \sin \theta_2 & \cos \theta_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ \hline 0 & 0 & 0 & 1 \end{array} \right] \left[\begin{array}{ccc|c} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_2 \\ \hline 0 & 0 & 0 & 1 \end{array} \right] \left[\begin{array}{ccc|c} 1 & 0 & 0 & a_2 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ \hline 0 & 0 & 0 & 1 \end{array} \right] \left[\begin{array}{ccc|c} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha_2 & -\sin \alpha_2 & 0 \\ 0 & \sin \alpha_2 & \cos \alpha_2 & 0 \\ \hline 0 & 0 & 0 & 1 \end{array} \right]$$

$$A_2^1 = \left[\begin{array}{ccc|c} \cos q_1 & -\sin q_1 & 0 & r_2 \cos q_1 \\ \sin q_1 & \cos q_1 & 0 & r_2 \sin q_1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ \hline 0 & 0 & 0 & 1 \end{array} \right] \quad (6.2)$$

Matriz de transformación homogénea de la segunda vértebra a la 3^a vértebra:

$$A_3^2 = \left[\begin{array}{ccc|c} \cos \theta_3 & -\sin \theta_3 & 0 & 0 \\ \sin \theta_3 & \cos \theta_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ \hline 0 & 0 & 0 & 1 \end{array} \right] \left[\begin{array}{ccc|c} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_3 \\ \hline 0 & 0 & 0 & 1 \end{array} \right] \left[\begin{array}{ccc|c} 1 & 0 & 0 & a_3 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ \hline 0 & 0 & 0 & 1 \end{array} \right] \left[\begin{array}{ccc|c} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha_3 & -\sin \alpha_3 & 0 \\ 0 & \sin \alpha_3 & \cos \alpha_3 & 0 \\ \hline 0 & 0 & 0 & 1 \end{array} \right]$$

$$A_3^2 = \left[\begin{array}{ccc|c} \cos q_2 & -\sin q_2 & 0 & r_3 \cos q_2 \\ \sin q_2 & \cos q_2 & 0 & r_3 \sin q_2 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ \hline 0 & 0 & 0 & 1 \end{array} \right] \quad (6.3)$$

Matriz de transformación homogénea de la 3^a vértebra a la 4^a vértebra:

$$A_4^3 = \left[\begin{array}{ccc|c} \cos \theta_3 & -\sin \theta_3 & 0 & 0 \\ \sin \theta_3 & \cos \theta_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ \hline 0 & 0 & 0 & 1 \end{array} \right] \left[\begin{array}{ccc|c} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_3 \\ \hline 0 & 0 & 0 & 1 \end{array} \right] \left[\begin{array}{ccc|c} 1 & 0 & 0 & a_3 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ \hline 0 & 0 & 0 & 1 \end{array} \right] \left[\begin{array}{ccc|c} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha_3 & -\sin \alpha_3 & 0 \\ 0 & \sin \alpha_3 & \cos \alpha_3 & 0 \\ \hline 0 & 0 & 0 & 1 \end{array} \right]$$

$$A_4^3 = \left[\begin{array}{ccc|c} \cos q_3 & -\sin q_3 & 0 & r_4 \cos q_3 \\ \sin q_3 & \cos q_3 & 0 & r_4 \sin q_3 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ \hline 0 & 0 & 0 & 1 \end{array} \right] \quad (6.4)$$

Calculando la matriz de transformación homogénea de la 4^a vértebra a la cabeza:

$$A_5^4 = \left[\begin{array}{ccc|c} \cos \theta_4 & -\sin \theta_4 & 0 & 0 \\ \sin \theta_4 & \cos \theta_4 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ \hline 0 & 0 & 0 & 1 \end{array} \right] \left[\begin{array}{ccc|c} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_4 \\ \hline 0 & 0 & 0 & 1 \end{array} \right] \left[\begin{array}{ccc|c} 1 & 0 & 0 & a_4 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ \hline 0 & 0 & 0 & 1 \end{array} \right] \left[\begin{array}{ccc|c} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha_4 & -\sin \alpha_4 & 0 \\ 0 & \sin \alpha_4 & \cos \alpha_4 & 0 \\ \hline 0 & 0 & 0 & 1 \end{array} \right]$$

$$A_5^4 = \left[\begin{array}{ccc|c} \cos q_4 & -\sin q_4 & 0 & r_5 \cos q_4 \\ \sin q_4 & \cos q_4 & 0 & r_5 \sin q_4 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ \hline 0 & 0 & 0 & 1 \end{array} \right] \quad (6.5)$$

De [Ecuación 5.56](#), la matriz de transformación Homogénea general de la columna es:

$$T_{COLUMN A} = [A_5^0] = [A_1^0] [A_2^1] [A_3^2] [A_4^3] [A_5^4] = \left[\begin{array}{ccc|c} a & e & i & m \\ b & f & j & n \\ c & g & k & o \\ \hline d & h & l & p \end{array} \right] \quad (6.6)$$

Donde las letras $a, b, c, d, e, f, g, h, i, j, k, l, m, n, o, p$ son los elementos de la matriz de transformación homogénea general correspondientes a la columna. Aplicando recursivamente las ecuaciones, (ver [Subsección 5.2.1](#)) se reducen las siguientes expresiones:

$$\begin{aligned} a &= \cos q_4 (\cos q_3 (\cos q_1 * \cos q_2 - \sin q_1 * \sin q_2) - \sin q_3 (\cos q_1 * \sin q_2 + \cos q_2 * \sin q_1)) \dots \\ &\dots - \sin q_4 (\cos q_3 (\cos q_1 * \sin q_2 + \cos q_2 * \sin q_1) + \sin q_3 (\cos q_1 * \cos q_2 - \sin q_1 * \sin q_2)) \\ a &= \cos q_4 (\cos q_3 * \cos(q_1 + q_2) - \sin q_3 * \sin(q_1 + q_2)) - \sin q_4 (\cos q_3 * \sin(q_1 + q_2) + \sin q_3 * \cos(q_1 + q_2)) \\ a &= \cos q_4 * \cos(q_1 + q_2 + q_3) - \sin q_4 * \sin(q_1 + q_2 + q_3) \\ \\ a &= \cos(q_1 + q_2 + q_3 + q_4) \end{aligned} \quad (6.7)$$

$$\begin{aligned} b &= \cos q_4 (\cos q_3 (\cos q_1 * \sin q_2 + \cos q_2 * \sin q_1) + \sin q_3 (\cos q_1 * \cos q_2 - \sin q_1 * \sin q_2)) \dots \\ &\dots + \sin q_4 (\cos q_3 (\cos q_1 * \cos q_2 - \sin q_1 * \sin q_2) - \sin q_3 (\cos q_1 * \sin q_2 + \cos q_2 * \sin q_1)) \\ b &= \cos q_4 (\cos q_3 * \sin(q_1 + q_2) + \sin q_3 * \cos(q_1 + q_2)) + \sin q_4 (\cos q_3 * \cos(q_1 + q_2) - \sin q_3 * \sin(q_1 + q_2)) \\ b &= \cos q_4 * \sin(q_1 + q_2 + q_3) + \sin q_4 * \cos(q_1 + q_2 + q_3) \\ \\ b &= \sin(q_1 + q_2 + q_3 + q_4) \end{aligned} \quad (6.8)$$

$$\begin{aligned} e &= -\cos q_4 ((\cos q_3) (\cos q_1 \sin q_2 + \cos q_2 \sin q_1) + (\sin q_3) (\cos q_1 \cos q_2 - \sin q_1 \sin q_2)) \dots \\ &\dots - (\sin q_4) ((\cos q_3) (\cos q_1 \cos q_2 - \sin q_1 \sin q_2) - (\sin q_3) (\cos q_1 \sin q_2 + \cos q_2 \sin q_1)) \\ e &= -\cos q_4 (\cos q_3 * \sin(q_1 + q_2) + \sin q_3 * \cos(q_1 + q_2)) - \sin q_4 (\cos q_3 * \cos(q_1 + q_2) - \sin q_3 * \sin(q_1 + q_2)) \\ e &= -\cos q_4 * \sin(q_1 + q_2 + q_3) - \sin q_4 * \cos(q_1 + q_2 - q_3) \\ \\ e &= -b = -\sin(q_1 + q_2 + q_3 + q_4) \end{aligned} \quad (6.9)$$

$$\begin{aligned}
f &= \cos q_4 (\cos q_3 (\cos q_1 * \cos q_2 - \sin q_1 * \sin q_2) - \sin q_3 (\cos q_1 * \sin q_2 + \cos q_2 * \sin q_1)) \dots \\
&\dots - \sin q_4 (\cos q_3 (\cos q_1 * \sin q_2 + \cos q_2 * \sin q_1) + \sin q_3 (\cos q_1 * \cos q_2 - \sin q_1 * \sin q_2)) \\
f &= \cos q_4 (\cos q_3 * \cos(q_1 + q_2) - \sin q_3 * \sin(q_1 + q_2)) - \sin q_4 (\cos q_3 * \sin(q_1 + q_2) + \sin q_3 * \cos(q_1 + q_2)) \\
f &= \cos q_4 * \cos(q_1 + q_2 + q_3) - \sin q_4 * \sin(q_1 + q_2 + q_3) \\
f &= a = \cos(q_1 + q_2 + q_3 + q_4) = a
\end{aligned} \tag{6.10}$$

$$\begin{aligned}
m &= r_1 + r_2 \cos q_1 + r_4 (\cos q_3 (\cos q_1 \cos q_2 - \sin q_1 \sin q_2) - r_4 (\sin q_3 (\cos q_1 \sin q_2 + \cos q_2 \sin q_1)) \dots \\
&\dots + r_5 (\cos q_4 ((\cos q_3 (\cos q_1 \cos q_2 - \sin q_1 \sin q_2) - (\sin q_3 (\cos q_1 \sin q_2 + \cos q_2 \sin q_1)) \dots \\
&\dots - r_5 (\sin q_4 ((\cos q_3 (\cos q_1 \sin q_2 + \cos q_2 \sin q_1) + (\sin q_3 (\cos q_1 \cos q_2 - \sin q_1 \sin q_2)) \dots \\
&\dots + r_3 \cos q_1 \cos q_2 - r_3 \sin q_1 \sin q_2 \\
m &= r_1 + r_2 \cos q_1 + r_3 \cos(q_1 + q_2) + r_4 \cos q_3 * \cos(q_1 + q_2) - r_4 \sin q_3 * \sin(q_1 + q_2) \dots \\
&+ r_5 \cos q_4 (\cos q_3 * \cos(q_1 + q_2) - \sin q_3 * \sin(q_1 + q_2)) - r_5 \sin q_4 (\cos q_3 * \sin(q_1 + q_2) + \sin q_3 * \cos(q_1 + q_2)) \\
m &= r_1 + r_2 \cos q_1 + r_3 \cos(q_1 + q_2) + r_4 \cos(q_1 + q_2 + q_3) + r_5 \cos q_4 * \cos(q_1 + q_2 + q_3) \dots \\
&\dots - r_5 \sin q_4 * \sin(q_1 + q_2 + q_3) \\
m &= r_1 + r_2 \cos q_1 + r_3 \cos(q_1 + q_2) + r_4 \cos(q_1 + q_2 + q_3) + r_5 \cos(q_1 + q_2 + q_3 + q_4) \\
m &= r_1 + r_2 \cos q_1 + r_3 \cos(q_1 + q_2) + r_4 \cos(q_1 + q_2 + q_3) + r_5 a
\end{aligned} \tag{6.11}$$

$$\begin{aligned}
n &= r_2 \sin q_1 + r_4 (\cos q_3 (\cos q_1 \sin q_2 + \cos q_2 \sin q_1) + r_4 (\sin q_3 (\cos q_1 \cos q_2 - \sin q_1 \sin q_2) \dots \\
&\dots + r_5 (\cos q_4 ((\cos q_3 (\cos q_1 \sin q_2 + \cos q_2 \sin q_1) + (\sin q_3 (\cos q_1 \cos q_2 - \sin q_1 \sin q_2)) \dots \\
&\dots + r_5 (\sin q_4 ((\cos q_3 (\cos q_1 \cos q_2 - \sin q_1 \sin q_2) - (\sin q_3 (\cos q_1 \sin q_2 + \cos q_2 \sin q_1)) \dots \\
&\dots + r_3 \cos q_1 \sin q_2 + r_3 \cos q_2 \sin q_1 \\
n &= r_2 \sin q_1 + r_4 \cos q_3 \sin(q_1 + q_2) + r_4 \sin q_3 \cos(q_1 + q_2) + r_5 \cos q_4 \cos q_3 \sin(q_1 + q_2) \dots \\
&\dots + \sin q_3 \cos(q_1 + q_2) + r_5 \sin q_4 \cos q_3 \cos(q_1 + q_2) - \sin q_3 \sin(q_1 + q_2) + r_3 \sin(q_1 + q_2) \\
n &= r_2 \sin q_1 + r_3 \sin(q_1 + q_2) + r_4 \sin(q_1 + q_2 + q_3) + r_5 \cos q_4 \sin(q_1 + q_2 + q_3) \dots
\end{aligned}$$

$$\dots + r_5 \sin q_4 \cos q_3 \cos(q_1 + q_2 + q_3)$$

$$n = r_2 \sin q_1 + r_3 \sin(q_1 + q_2) + r_4 \sin(q_1 + q_2 + q_3) + r_5 \sin(q_1 + q_2 + q_3 + q_4)$$

$$n = r_2 \sin q_1 + r_3 \sin(q_1 + q_2) + r_4 \sin(q_1 + q_2 + q_3) + r_5 b \quad (6.12)$$

$$c = d = g = h = i = j = l = o = 0 \quad (6.13)$$

$$k = p = 1 \quad (6.14)$$

■ Robot (C) Brazo Izquierdo

Del diagrama robótica C en la [Tabla 6.1](#) se obtienen los siguientes parametros de DENAVIT HARTENBERG [TABLA 6.3](#)

Cuadro 6.3: Tabla de Parámetros Denavit-Hartenberg para brazo izquierdo [Tabla 6.1](#) (C)

Eslabones	zi	xi		
n	ϑ_i	d_i	a_i	α_i
1	0	l_1	0	π
2	$-\pi/2 + q_1$	0	0	$-\pi/2$
3	$-\pi/2 + q_2$	0	0	$-\pi/2$
4	$-\pi/2 + q_3$	r_1	0	$-\pi/2$
5	$\pi/2 + q_4$	0	r_2	0
6	q_5	0	r_3	0

usando las ecuaciones [Ecuación 5.51](#) y [Ecuación 5.54](#) para cada elemento del robot (columna) se tiene que:

Matriz de transformación homogénea de la cadera al 1º Grado de libertad en el hombro:

$$A_1^0 = \left[\begin{array}{ccc|c} \cos \theta_1 & -\sin \theta_1 & 0 & 0 \\ \sin \theta_1 & \cos \theta_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ \hline 0 & 0 & 0 & 1 \end{array} \right] \left[\begin{array}{ccc|c} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_1 \\ \hline 0 & 0 & 0 & 1 \end{array} \right] \left[\begin{array}{ccc|c} 1 & 0 & 0 & a_1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ \hline 0 & 0 & 0 & 1 \end{array} \right] \left[\begin{array}{ccc|c} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha_1 & -\sin \alpha_1 & 0 \\ 0 & \sin \alpha_1 & \cos \alpha_1 & 0 \\ \hline 0 & 0 & 0 & 1 \end{array} \right]$$

$$A_1^0 = \left[\begin{array}{ccc|c} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & l_1 \\ \hline 0 & 0 & 0 & 1 \end{array} \right] \quad (6.15)$$

Matriz de transformación homogénea del 1º Grado de libertad al 2º en el hombro:

$$A_2^1 = \left[\begin{array}{ccc|c} \cos \theta_2 & -\sin \theta_2 & 0 & 0 \\ \sin \theta_2 & \cos \theta_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ \hline 0 & 0 & 0 & 1 \end{array} \right] \left[\begin{array}{ccc|c} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_2 \\ \hline 0 & 0 & 0 & 1 \end{array} \right] \left[\begin{array}{ccc|c} 1 & 0 & 0 & a_2 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ \hline 0 & 0 & 0 & 1 \end{array} \right] \left[\begin{array}{ccc|c} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha_2 & -\sin \alpha_2 & 0 \\ 0 & \sin \alpha_2 & \cos \alpha_2 & 0 \\ \hline 0 & 0 & 0 & 1 \end{array} \right]$$

$$A_2^1 = \left[\begin{array}{ccc|c} -\cos q_1 & 0 & -\sin q_1 & 0 \\ -\sin q_1 & 0 & \cos q_1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ \hline 0 & 0 & 0 & 1 \end{array} \right] \quad (6.16)$$

Matriz de transformación homogénea del 2º Grado de libertad al 3º en el hombro:

$$A_3^2 = \left[\begin{array}{ccc|c} \cos \theta_3 & -\sin \theta_3 & 0 & 0 \\ \sin \theta_3 & \cos \theta_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ \hline 0 & 0 & 0 & 1 \end{array} \right] \left[\begin{array}{ccc|c} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_3 \\ \hline 0 & 0 & 0 & 1 \end{array} \right] \left[\begin{array}{ccc|c} 1 & 0 & 0 & a_3 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ \hline 0 & 0 & 0 & 1 \end{array} \right] \left[\begin{array}{ccc|c} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha_3 & -\sin \alpha_3 & 0 \\ 0 & \sin \alpha_3 & \cos \alpha_3 & 0 \\ \hline 0 & 0 & 0 & 1 \end{array} \right]$$

$$A_3^2 = \left[\begin{array}{ccc|c} -\sin q_2 & 0 & \cos q_2 & 0 \\ \cos q_2 & 0 & \sin q_2 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ \hline 0 & 0 & 0 & 1 \end{array} \right] \quad (6.17)$$

Matriz de transformación homogénea del 3º grado de libertad al codo:

$$A_4^3 = \left[\begin{array}{ccc|c} \cos \theta_3 & -\sin \theta_3 & 0 & 0 \\ \sin \theta_3 & \cos \theta_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ \hline 0 & 0 & 0 & 1 \end{array} \right] \left[\begin{array}{ccc|c} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_3 \\ \hline 0 & 0 & 0 & 1 \end{array} \right] \left[\begin{array}{ccc|c} 1 & 0 & 0 & a_3 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ \hline 0 & 0 & 0 & 1 \end{array} \right] \left[\begin{array}{ccc|c} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha_3 & -\sin \alpha_3 & 0 \\ 0 & \sin \alpha_3 & \cos \alpha_3 & 0 \\ \hline 0 & 0 & 0 & 1 \end{array} \right]$$

$$A_4^3 = \left[\begin{array}{ccc|c} -\sin q_3 & 0 & -\cos q_3 & 0 \\ \cos q_3 & 0 & -\sin q_3 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & r_1 \\ \hline 0 & 0 & 0 & 1 \end{array} \right] \quad (6.18)$$

Matriz de transformación homogénea del codo a la muñeca:

$$A_5^4 = \left[\begin{array}{ccc|c} \cos \theta_4 & -\sin \theta_4 & 0 & 0 \\ \sin \theta_4 & \cos \theta_4 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ \hline 0 & 0 & 0 & 1 \end{array} \right] \left[\begin{array}{ccc|c} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_4 \\ \hline 0 & 0 & 0 & 1 \end{array} \right] \left[\begin{array}{ccc|c} 1 & 0 & 0 & a_4 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ \hline 0 & 0 & 0 & 1 \end{array} \right] \left[\begin{array}{ccc|c} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha_4 & -\sin \alpha_4 & 0 \\ 0 & \sin \alpha_4 & \cos \alpha_4 & 0 \\ \hline 0 & 0 & 0 & 1 \end{array} \right]$$

$$A_5^4 = \left[\begin{array}{ccc|c} \sin q_4 & \cos q_4 & 0 & r_2 \sin q_4 \\ -\cos q_4 & \sin q_4 & 0 & -r_2 \cos q_4 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ \hline 0 & 0 & 0 & 1 \end{array} \right] \quad (6.19)$$

Matriz de transformación homogénea del muñeca al efecto final:

$$A_6^5 = \left[\begin{array}{ccc|c} \cos \theta_5 & -\sin \theta_5 & 0 & 0 \\ \sin \theta_5 & \cos \theta_5 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ \hline 0 & 0 & 0 & 1 \end{array} \right] \left[\begin{array}{ccc|c} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_5 \\ \hline 0 & 0 & 0 & 1 \end{array} \right] \left[\begin{array}{ccc|c} 1 & 0 & 0 & a_5 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ \hline 0 & 0 & 0 & 1 \end{array} \right] \left[\begin{array}{ccc|c} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha_5 & -\sin \alpha_5 & 0 \\ 0 & \sin \alpha_5 & \cos \alpha_5 & 0 \\ \hline 0 & 0 & 0 & 1 \end{array} \right]$$

$$A_6^5 = \left[\begin{array}{ccc|c} \cos q_5 & -\sin q_5 & 0 & r_3 \cos q_5 \\ \sin q_5 & \cos q_5 & 0 & r_3 \sin q_5 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ \hline 0 & 0 & 0 & 1 \end{array} \right] \quad (6.20)$$

De Ecuación 5.56, la matriz de transformación homogénea general del brazo izquierdo es:

$$T_{BIZQUIERDO} = [A_6^0] = [A_1^0] [A_2^1] [A_3^2] [A_4^3] [A_5^4] [A_6^5] = \left[\begin{array}{ccc|c} a & e & i & m \\ b & f & j & n \\ c & g & k & o \\ \hline d & h & l & p \end{array} \right] \quad (6.21)$$

Donde:

$$a = -(\cos q_5) ((\sin q_4) (\cos q_3 \sin q_1 + \cos q_1 \sin q_2 \sin q_3) + \cos q_1 \cos q_2 \cos q_4) \dots \quad (6.22)$$

$$\dots - (\sin q_5) ((\cos q_4) (\cos q_3 \sin q_1 + \cos q_1 \sin q_2 \sin q_3) - \cos q_1 \cos q_2 \sin q_4)$$

$$b = (\cos q_5) ((\sin q_4) (\cos q_1 \cos q_3 - \sin q_1 \sin q_2 \sin q_3) - \cos q_2 \cos q_4 \sin q_1) \dots \quad (6.23)$$

$$\dots + (\sin q_5) ((\cos q_4) (\cos q_1 \cos q_3 - \sin q_1 \sin q_2 \sin q_3) + \cos q_2 \sin q_1 \sin q_4)$$

$$c = (\cos q_5) (\cos q_4 \sin q_2 - \cos q_2 \sin q_3 \sin q_4) - (\sin q_5) (\sin q_2 \sin q_4 + \cos q_2 \cos q_4 \sin q_3) \quad (6.24)$$

$$e = (\sin q_5) ((\sin q_4) (\cos q_3 \sin q_1 + \cos q_1 \sin q_2 \sin q_3) + \cos q_1 \cos q_2 \cos q_4) \dots \quad (6.25)$$

$$\dots - (\cos q_5) ((\cos q_4) (\cos q_3 \sin q_1 + \cos q_1 \sin q_2 \sin q_3) - \cos q_1 \cos q_2 \sin q_4)$$

$$f = (\cos q_5) ((\cos q_4) (\cos q_1 \cos q_3 - \sin q_1 \sin q_2 \sin q_3) + \cos q_2 \sin q_1 \sin q_4) \dots \quad (6.26)$$

$$\dots - (\sin q_5) ((\sin q_4) (\cos q_1 \cos q_3 - \sin q_1 \sin q_2 \sin q_3) - \cos q_2 \cos q_4 \sin q_1)$$

$$g = -(\cos q_5) (\sin q_2 \sin q_4 + \cos q_2 \cos q_4 \sin q_3) - (\sin q_5) (\cos q_4 \sin q_2 - \cos q_2 \sin q_3 \sin q_4) \quad (6.27)$$

$$i = \sin q_1 \sin q_3 - \cos q_1 \cos q_3 \sin q_2 \quad (6.28)$$

$$j = -\cos q_1 \sin q_3 - \cos q_3 \sin q_1 \sin q_2 \quad (6.29)$$

$$k = -\cos q_2 \cos q_3 \quad (6.30)$$

$$m = -r_3 (\cos q_5) ((\sin q_4) (\cos q_3 \sin q_1 + \cos q_1 \sin q_2 \sin q_3) + \cos q_1 \cos q_2 \cos q_4) \dots \quad (6.31)$$

$$\dots - r_3 (\sin q_5) ((\cos q_4) (\cos q_3 \sin q_1 + \cos q_1 \sin q_2 \sin q_3) - \cos q_1 \cos q_2 \sin q_4) \dots$$

$$\dots - r_2 (\sin q_4) (\cos q_3 \sin q_1 + \cos q_1 \sin q_2 \sin q_3) - r_1 \cos q_1 \cos q_2 - r_2 \cos q_1 \cos q_2 \cos q_4$$

$$n = r_3 (\cos q_5) ((\sin q_4) (\cos q_1 \cos q_3 - \sin q_1 \sin q_2 \sin q_3) - \cos q_2 \cos q_4 \sin q_1) \dots \quad (6.32)$$

$$\dots + r_3 (\sin q_5) ((\cos q_4) (\cos q_1 \cos q_3 - \sin q_1 \sin q_2 \sin q_3) + \cos q_2 \sin q_1 \sin q_4) \dots$$

$$\dots + r_2 (\sin q_4) (\cos q_1 \cos q_3 - \sin q_1 \sin q_2 \sin q_3) - r_1 \cos q_2 \sin q_1 - r_2 \cos q_2 \cos q_4 \sin q_1$$

$$o = l_1 + r_1 \sin q_2 + r_3 (\cos q_5) (\cos q_4 \sin q_2 - \cos q_2 \sin q_3 \sin q_4) \dots$$

$$\dots - r_3 (\sin q_5) (\sin q_2 \sin q_4 + \cos q_2 \cos q_4 \sin q_3) + r_2 \cos q_4 \sin q_2 - r_2 \cos q_2 \sin q_3 \sin q_4$$

$$o = l_1 + r_1 \sin q_2 + r_2 (\cos q_4 \sin q_2 - \cos q_2 \sin q_3 \sin q_4) \dots \quad (6.33)$$

$$\dots r_3 ((\cos q_5) (\cos q_4 \sin q_2 - \cos q_2 \sin q_3 \sin q_4) - (\sin q_5) (\sin q_2 \sin q_4 + \cos q_2 \cos q_4 \sin q_3))$$

$$d = h = l = 0 \quad (6.34)$$

$$p = 1 \quad (6.35)$$

▪ Robot (A) Brazo Derecho

Del diagrama robótica A en la [Tabla 6.1](#) se obtienen los siguientes parametros de DENAVIT HARTENBERG

Cuadro 6.4: Tabla de Parámetros Denavit-Hartenberg para la brazo derecho [Tabla 6.1 \(A\)](#)

Eslabones	zi	xi		
n	ϑ_i	d_i	a_i	α_i
1	0	l_1	0	0
2	$\pi/2+q_1$	0	0	$\pi/2$
3	$\pi/2+q_2$	0	0	$\pi/2$
4	$\pi/2+q_3$	r_1	0	$-\pi/2$
5	$-\pi/2+q_4$	0	r_2	0
6	q_5	0	r_3	0

usando las ecuaciones [Ecuación 5.51](#) y [Ecuación 5.54](#) para cada elemento del robot (columna) se tiene que:

Matriz de transformación homogénea de la cadera al 1º GDL en el hombro

$$A_1^0 = \left[\begin{array}{ccc|c} \cos \theta_1 & -\sin \theta_1 & 0 & 0 \\ \sin \theta_1 & \cos \theta_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ \hline 0 & 0 & 0 & 1 \end{array} \right] \left[\begin{array}{ccc|c} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_1 \\ \hline 0 & 0 & 0 & 1 \end{array} \right] \left[\begin{array}{ccc|c} 1 & 0 & 0 & a_1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ \hline 0 & 0 & 0 & 1 \end{array} \right] \left[\begin{array}{ccc|c} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha_1 & -\sin \alpha_1 & 0 \\ 0 & \sin \alpha_1 & \cos \alpha_1 & 0 \\ \hline 0 & 0 & 0 & 1 \end{array} \right]$$

$$A_1^0 = \left[\begin{array}{ccc|c} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & l_1 \\ \hline 0 & 0 & 0 & 1 \end{array} \right] \quad (6.36)$$

Matriz de transformación homogénea del 1º GDL al 2º en el hombro

$$A_2^1 = \left[\begin{array}{ccc|c} \cos \theta_2 & -\sin \theta_2 & 0 & 0 \\ \sin \theta_2 & \cos \theta_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ \hline 0 & 0 & 0 & 1 \end{array} \right] \left[\begin{array}{ccc|c} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_2 \\ \hline 0 & 0 & 0 & 1 \end{array} \right] \left[\begin{array}{ccc|c} 1 & 0 & 0 & a_2 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ \hline 0 & 0 & 0 & 1 \end{array} \right] \left[\begin{array}{ccc|c} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha_2 & -\sin \alpha_2 & 0 \\ 0 & \sin \alpha_2 & \cos \alpha_2 & 0 \\ \hline 0 & 0 & 0 & 1 \end{array} \right]$$

$$A_2^1 = \left[\begin{array}{ccc|c} -\sin q_2 & 0 & \cos q_2 & 0 \\ \cos q_2 & 0 & \sin q_2 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ \hline 0 & 0 & 0 & 1 \end{array} \right] \quad (6.37)$$

Matriz de transformación homogénea del 2º GDL al 3º en el hombro:

$$A_3^2 = \left[\begin{array}{ccc|c} \cos \theta_3 & -\sin \theta_3 & 0 & 0 \\ \sin \theta_3 & \cos \theta_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ \hline 0 & 0 & 0 & 1 \end{array} \right] \left[\begin{array}{ccc|c} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_3 \\ \hline 0 & 0 & 0 & 1 \end{array} \right] \left[\begin{array}{ccc|c} 1 & 0 & 0 & a_3 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ \hline 0 & 0 & 0 & 1 \end{array} \right] \left[\begin{array}{ccc|c} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha_3 & -\sin \alpha_3 & 0 \\ 0 & \sin \alpha_3 & \cos \alpha_3 & 0 \\ \hline 0 & 0 & 0 & 1 \end{array} \right]$$

$$A_3^2 = \left[\begin{array}{ccc|c} -\sin q_2 & 0 & \cos q_2 & 0 \\ \cos q_2 & 0 & \sin q_2 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ \hline 0 & 0 & 0 & 1 \end{array} \right] \quad (6.38)$$

Matriz de transformación homogénea del tercer GDL al codo

$$A_4^3 = \left[\begin{array}{ccc|c} \cos \theta_3 & -\sin \theta_3 & 0 & 0 \\ \sin \theta_3 & \cos \theta_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ \hline 0 & 0 & 0 & 1 \end{array} \right] \left[\begin{array}{ccc|c} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_3 \\ \hline 0 & 0 & 0 & 1 \end{array} \right] \left[\begin{array}{ccc|c} 1 & 0 & 0 & a_3 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ \hline 0 & 0 & 0 & 1 \end{array} \right] \left[\begin{array}{ccc|c} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha_3 & -\sin \alpha_3 & 0 \\ 0 & \sin \alpha_3 & \cos \alpha_3 & 0 \\ \hline 0 & 0 & 0 & 1 \end{array} \right]$$

$$A_4^3 = \left[\begin{array}{ccc|c} -\sin q_3 & 0 & -\cos q_3 & 0 \\ \cos q_3 & 0 & -\sin q_3 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & r_1 \\ \hline 0 & 0 & 0 & 1 \end{array} \right] \quad (6.39)$$

Matriz de transformación homogénea del codo a la muñeca

$$A_5^4 = \left[\begin{array}{ccc|c} \cos \theta_4 & -\sin \theta_4 & 0 & 0 \\ \sin \theta_4 & \cos \theta_4 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ \hline 0 & 0 & 0 & 1 \end{array} \right] \left[\begin{array}{ccc|c} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_4 \\ \hline 0 & 0 & 0 & 1 \end{array} \right] \left[\begin{array}{ccc|c} 1 & 0 & 0 & a_4 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ \hline 0 & 0 & 0 & 1 \end{array} \right] \left[\begin{array}{ccc|c} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha_4 & -\sin \alpha_4 & 0 \\ 0 & \sin \alpha_4 & \cos \alpha_4 & 0 \\ \hline 0 & 0 & 0 & 1 \end{array} \right]$$

$$A_5^4 = \left[\begin{array}{ccc|c} \sin q_4 & \cos q_4 & 0 & r_2 \sin q_4 \\ -\cos q_4 & \sin q_4 & 0 & -r_2 \cos q_4 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ \hline 0 & 0 & 0 & 1 \end{array} \right] \quad (6.40)$$

Matriz e transformación homogénea del muñeca al efecto final:

$$A_6^5 = \left[\begin{array}{ccc|c} \cos \theta_5 & -\sin \theta_5 & 0 & 0 \\ \sin \theta_5 & \cos \theta_5 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ \hline 0 & 0 & 0 & 1 \end{array} \right] \left[\begin{array}{ccc|c} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_5 \\ \hline 0 & 0 & 0 & 1 \end{array} \right] \left[\begin{array}{ccc|c} 1 & 0 & 0 & a_5 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ \hline 0 & 0 & 0 & 1 \end{array} \right] \left[\begin{array}{ccc|c} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha_5 & -\sin \alpha_5 & 0 \\ 0 & \sin \alpha_5 & \cos \alpha_5 & 0 \\ \hline 0 & 0 & 0 & 1 \end{array} \right]$$

$$A_6^5 = \left[\begin{array}{ccc|c} \cos q_5 & -\sin q_5 & 0 & r_3 \cos q_5 \\ \sin q_5 & \cos q_5 & 0 & r_3 \sin q_5 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ \hline 0 & 0 & 0 & 1 \end{array} \right] \quad (6.41)$$

De [Ecuación 5.56](#), la matriz de transformación homogénea general del brazo derecho es:

$$T_{BDERECO} = [A_6^0] = [A_1^0] [A_2^1] [A_3^2] [A_4^3] [A_5^4] [A_6^5] = \left[\begin{array}{ccc|c} a & e & i & m \\ b & f & j & n \\ c & g & k & o \\ \hline d & h & l & p \end{array} \right] \quad (6.42)$$

- Determinación de parámetros biológicos (ángulos de las articulaciones involucradas, distancias entre los segmentos corporales)

La antropometría es la subdisciplina de biología encargada de dimensionar las partes anatómicas. Esta disciplina se ocupa de las dimensiones físicas y proporciones del cuerpo humano [\[89\]](#).

Las dimensiones físicas requeridas por el algoritmo de DENAVIT-HARTENBERG, específicamente la matriz de transformación total T de cada uno de los segmentos corporales son: **ángulos de cada movimiento en la articulación representado por la letra θ y las distancias entre articulaciones escritas en términos de la altura H** (ver [Figura 6.3](#)).

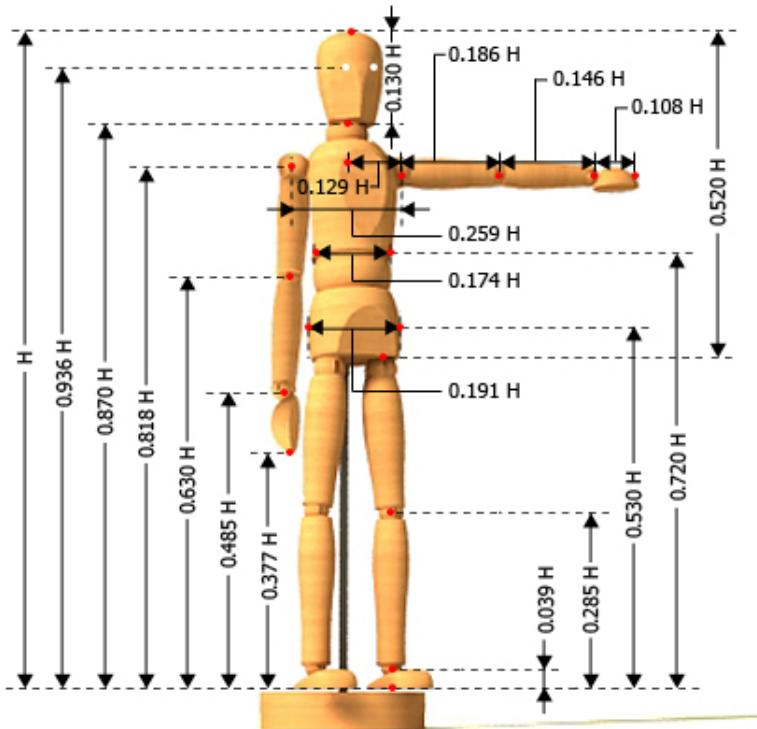


Figura 6.3: Segmentación del cuerpo humano en términos de la altura (H) [89].

Los ángulos de los movimientos por articulación se reportan en tablas considerando el segmento corporal y los movimientos que se describen, la primera de ellas es la columna (ver [Tabla 6.5](#)) correspondiente al primer robot.

Cuadro 6.5: Análisis radiográfico del movimiento de la columna lumbar en adultos asintomáticos con escala en grados. [90]

Segmento Vertebral	Flexión/Extensión		Flexión Lateral (izq. y der.)		Rotación
	a	b	a	b	
L1-L2	11.9 ± 3.5	13 ± 5	10.4 ± 2.8	10	2
L2-L3	14.5 ± 2.3	14 ± 2	12.4 ± 3.4	11	2
L3-L4	15.3 ± 2.0	13 ± 2	12.4 ± 4.3	10	3
L4-L5	18.2 ± 3.0	16 ± 4.0	9.5 ± 4.9	6	3
L5-S1	17 ± 4.3	14 ± 5	5.1	3	2
GDL	1		1		1

Para el 2º robot y 3º robot relacionados con los brazos se reporta una tabla para la articulación del hombro (ver [Tabla 6.7](#)) y la cabeza presente en la siguiente tabla:

Cuadro 6.6: Rango de movimiento de la cabeza

	Grados
Flexión	20
Extensión	30
Inclinación lateral	20
Rotación izquierda	80
Rotación derecha	80

Cuadro 6.7: Rango del movimiento del hombro en adultos sanos, 3 GDL [90]

Movimientos	Ángulo θ	GDL
Elevación	167 ± 4.7	1
Extensión	62 ± 9.5	
Rotación externa en abducción	104 ± 8.5	1
Rotación interna en abducción	69 ± 9.5	
Abducción	184 ± 7	1

La articulación del codo proporciona la siguiente información (ver [Tabla 6.8](#)).

Cuadro 6.8: Rango normal del movimiento del codo. [90]

	BOONE Y AZEN	GDL
Flexión	$141^\circ \pm 4.9$	1
Extensión	$0.3^\circ \pm 2.0$	

Finalmente los ángulos en la muñeca están reportado en la tabla siguiente (ver [Tabla 6.6](#)).

Cuadro 6.9: Rango de movimiento de la muñeca [90]

	BOONE Y AZEN	GDL
Flexión	$75^\circ \pm 6.6$	1
Extensión	$74^\circ \pm 6.6$	
Desviación radial	$21^\circ \pm 4.0$	
Desviación cubital	$35^\circ \pm 3.8$	

- **Parametros Biológicos de entrada para cada matriz de transformación (Brazos y columna)**

Los parámetros biológicos de la columna relacionados con la distancia entre vertebras se deduce a partir de la [Figura 6.3](#), primeramente se obtiene la distancia de toda la zona lumbar de la siguiente manera:

$$0.720H - 0.530H = 0.190H \quad (6.43)$$

la distancia obtenida de la zona lumbar se considera equidistante por lo que se divide entre las 5 vertebras que conforman la zona, para obtener la distancia entre los elementos

$$\frac{0.190H}{5} = 0.038H \quad (6.44)$$

y la distancia de la vertebra L1 a la cabeza se obtiene de la siguiente manera

$$1H - 0.720H = 0.280H + 0.190H = 0.470H \quad (6.45)$$

por lo que

$$r_{1col} = 0.038H \quad (6.46)$$

$$r_{2col} = 0.076H \quad (6.47)$$

$$r_{3col} = 0.114H \quad (6.48)$$

$$r_{4col} = 0.190H \quad (6.49)$$

$$r_{5col} = 0.470H \quad (6.50)$$

finalmente los ángulos en radianes de la columna son:

$$0 \leq q_{1col} \leq \frac{18.2 * \pi}{180} \quad (6.51)$$

$$0 \leq q_{2col} \leq \frac{15.3 * \pi}{180} \quad (6.52)$$

$$0 \leq q_{3col} \leq \frac{14.3 * \pi}{180} \quad (6.53)$$

$$0 \leq q_{4col} \leq \frac{11.9 * \pi}{180} \quad (6.54)$$

$$-\frac{20 * \pi}{180} \leq q_{5col} \leq \frac{30 * \pi}{180} \quad (6.55)$$

Para los **brazos** se tiene que la distancia de los segmentos son :

$$l_{1BR} = 0.129H \quad (6.56)$$

$$r_{1BR} = 0 \quad (6.57)$$

$$r_{2BR} = 0 \quad (6.58)$$

$$r_{3BR} = 0 \quad (6.59)$$

$$r_{4BR} = 0.186H \quad (6.60)$$

$$r_{5BR} = 0.146H \quad (6.61)$$

y los ángulos en términos de q son los siguientes

$$-\frac{62 * \pi}{180} \leq q_{BR} \leq \frac{167 * \pi}{180} \quad (6.62)$$

$$-\frac{104 * \pi}{180} \leq q_{2BR} \leq \frac{60 * \pi}{180} \quad (6.63)$$

$$0 \leq q_{3BR} \leq \frac{184 * \pi}{180} \quad (6.64)$$

$$0 \leq q_{4BR} \leq \frac{141 * \pi}{180} \quad (6.65)$$

$$-\frac{74 * \pi}{180} \leq q_{5BR} \leq \frac{75 * \pi}{180} \quad (6.66)$$

6.2. Sistema de medición

El sistema de medición se utiliza para medir y registrar señales obtenidas básicamente del **transductor** (dispositivo que transforma parámetros físicos en señales eléctricas aceptables para el sistema de medición), manejando la información digital. La cantidad digital consiste en un número cuya relación de tiempo contiene información referente a la magnitud o naturaleza de la misma.

El sistema de medición electrónica tiene como finalidad obtener información relacionada con las variables cinemáticas del esqueleto humano. La construcción del anterior con lleva a dividir en 3 bloques o grupos de control de información (ver [Figura 6.25](#)). El primero de izquierda a derecha es la unidad inercial, esta se coloca en el cuerpo del atleta de acuerdo con la sección de estudio. La segunda corresponde a la transmisión de la información por un canal de comunicación inalámbrica. El tercer grupo es la comunicación interna en la estación de trabajo para el procesamiento de la información e interpretación de los datos.

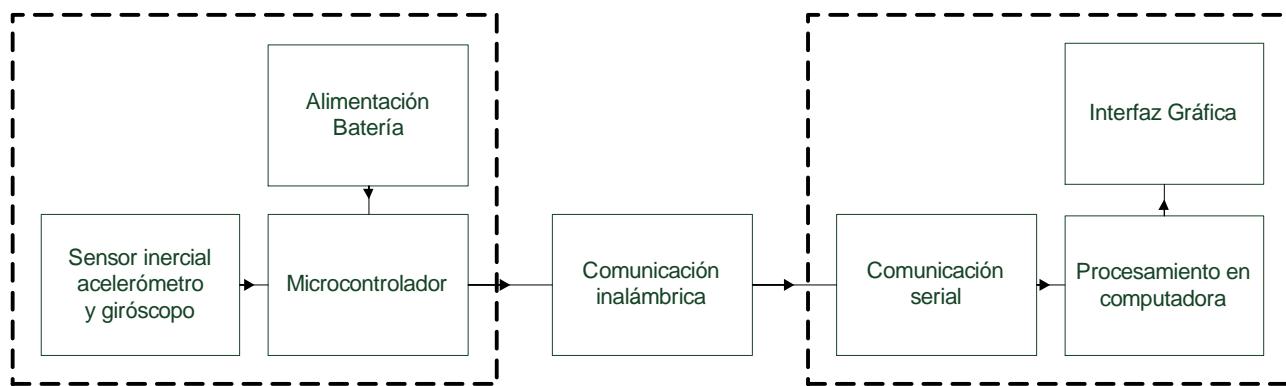


Figura 6.4: Diagrama a bloques del sistema electrónico de medición.

El flujo de la información dentro del sistema de medición se representa en la [Figura 6.6](#). Básicamente comienza con la petición de la computadora usando un carácter definido en el programa enviado en el puerto lógico(virtual) RS-232 inalámbrico, que al llegar al puerto físico RS-232 del AVR se hace una segunda petición al sensor IMU a través del puerto I2C donde viaja la información extraída del atleta, para ser almacenada en el microcontrolador y enviada de regreso a la computadora para ser procesado y desplegado como movimiento del modelo 3D así como datos cinemático. Dicho sistema requiere la construcción de una unidad inercial representado en el cuadro central de la [Figura 6.6](#), para su elaboración se desarrolló en 4 etapas principales(ver [Figura 6.5](#)) que posteriormente serán descritas.

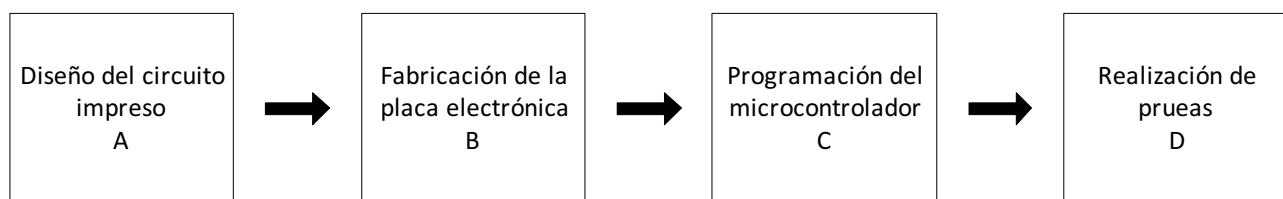


Figura 6.5: Etapas de construcción del sistema electrónico de medición

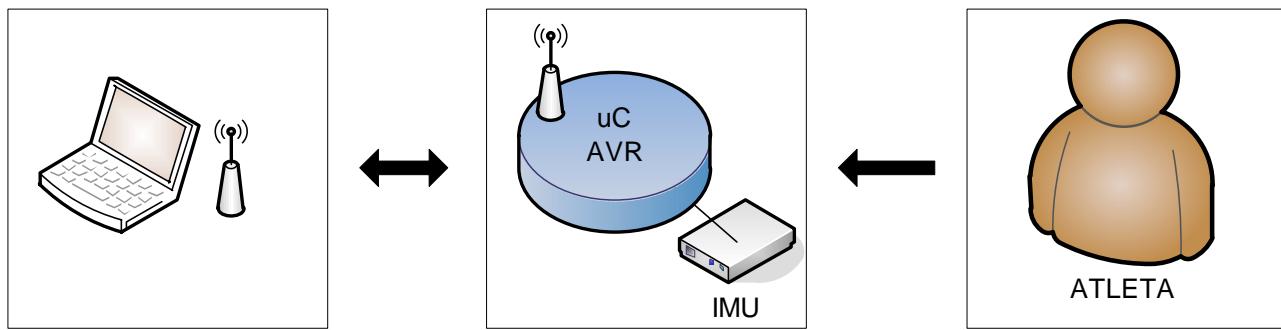


Figura 6.6: Flujo de la información en el sistema electrónico.

6.2.1. ETAPA A.- Diseño del circuito impreso

En esta primera etapa se realiza el diseño del circuito en protoboard y las pruebas correspondientes (ver [Figura 6.7](#)). En la misma se muestran cada uno de ellos conectados al microcontrolador Atmega48 después de haber realizado las pruebas de comunicación, para posteriormente utilizando el software Eagle y haciendo uso del diagrama eléctrico (ver [Figura 6.8](#)), determinar la orientación por elemento en el diagrama de la placa final y con esto optimizar el espacio utilizado para así evitar interferencias durante la actividad del atleta alternando la medición.

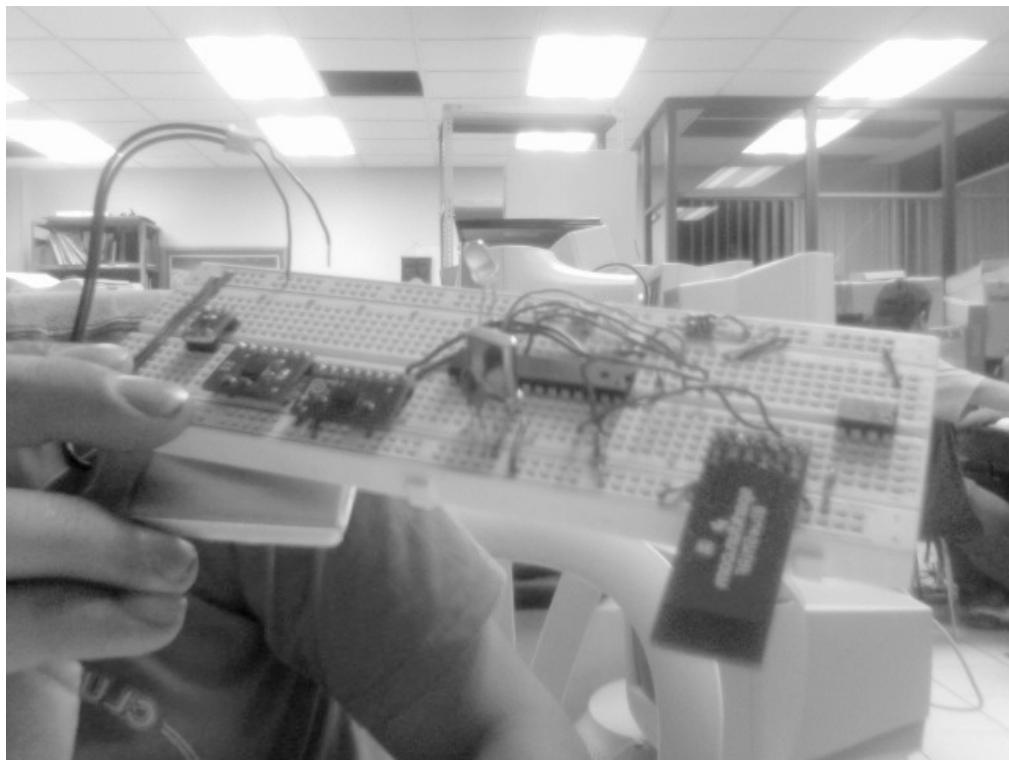


Figura 6.7: Prototipo armado en protoboard para pruebas experimentales

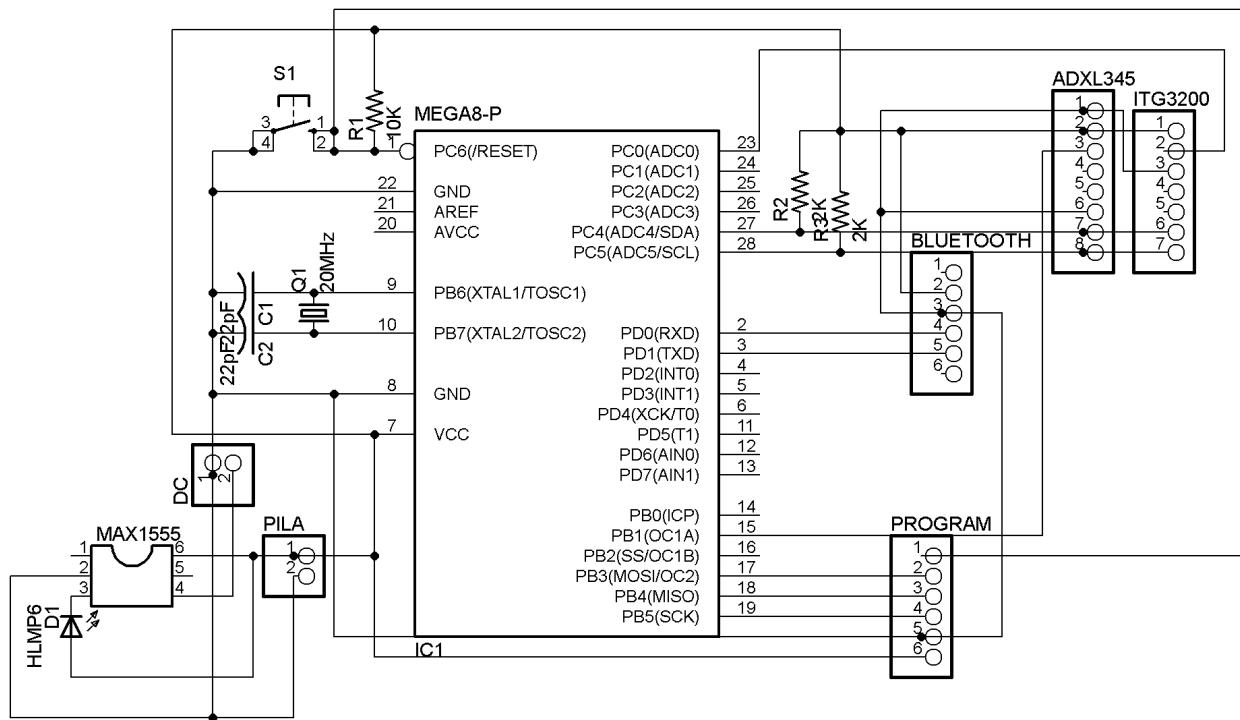


Figura 6.8: Diagrama eléctrico del sistema de medición.

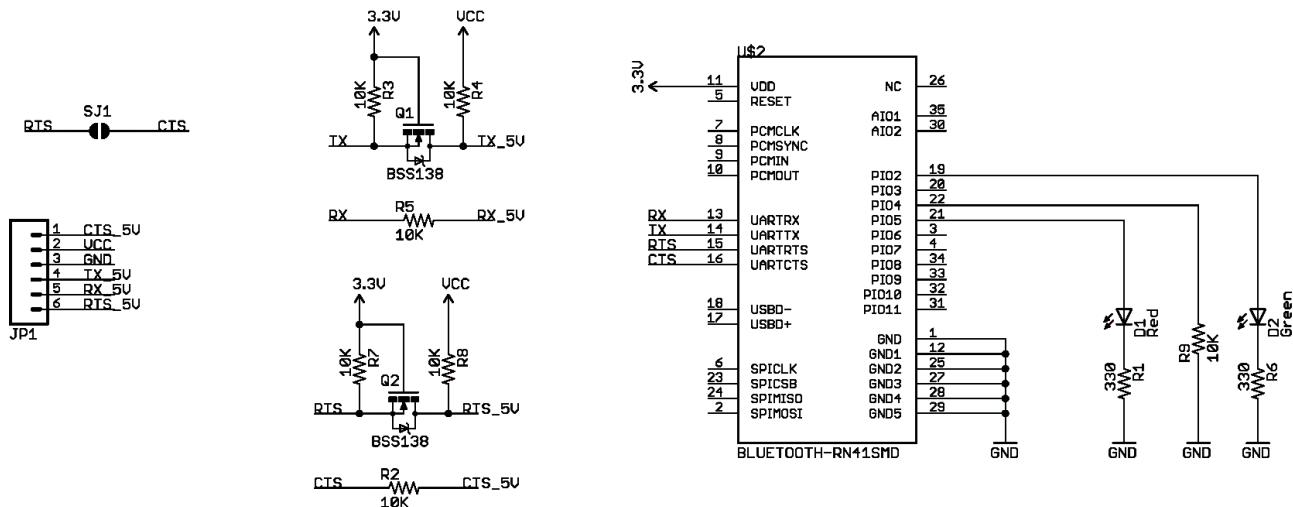


Figura 6.9: Diagrama eléctrico de la placa RN-41 Bluetooth [92]

Por otra parte los IMUS (acelerómetros y giróscopos) al ser componente de montaje superficial, en la unidad de medición inercial se considerarán como placas independientes (ver Figura 6.11) que se interfazan por medio de un bus al microcontrolador en sus respectivos pines.

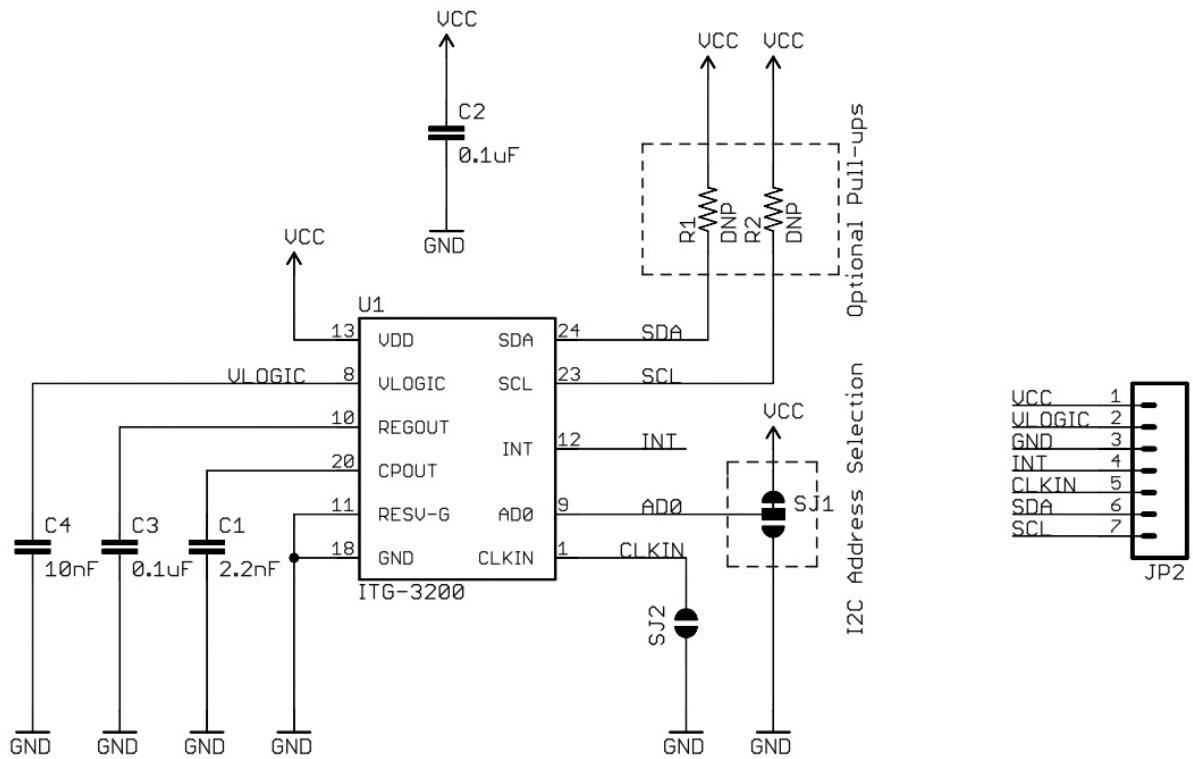


Figura 6.10: Diagrama esquemático de la placa para el giróscopo ITG-3200 [91]

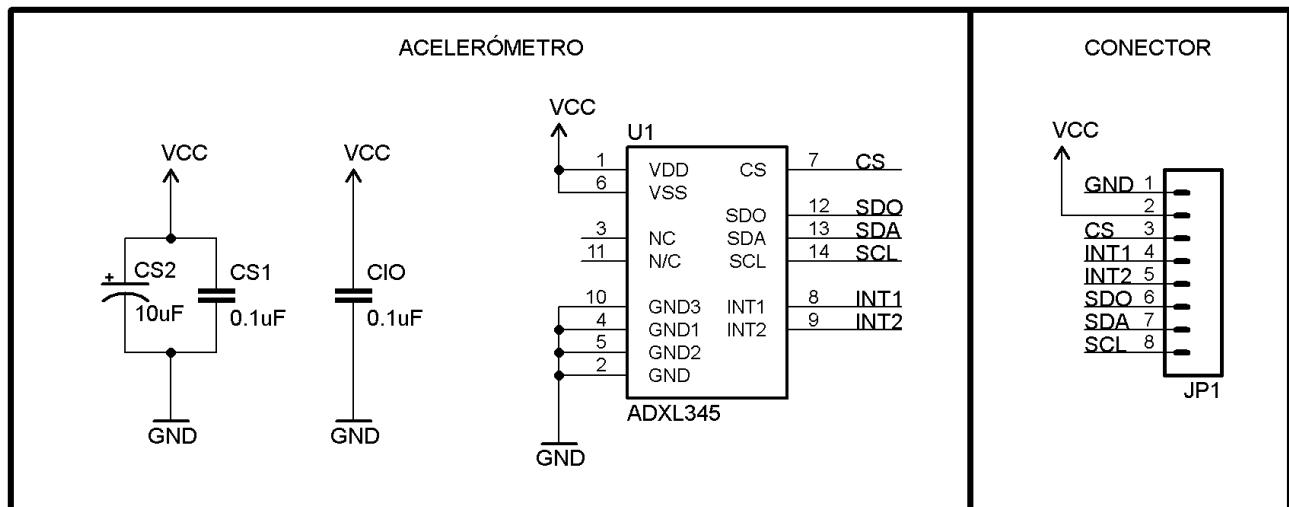


Figura 6.11: Diagrama esquemático de la placa para el acelerómetro ADXL345

6.2.2. ETAPA B.-Fabricación de la placa electrónica

Una vez concluida la etapa A donde se consiguen como productos los PCB correspondientes a placa de microcontrolador AVR y la de los MEMS (acelerómetro y giróscopo) utilizados por el sistema electrónico de medición (ver [Figura 6.12](#) y [Figura 6.13](#)) .

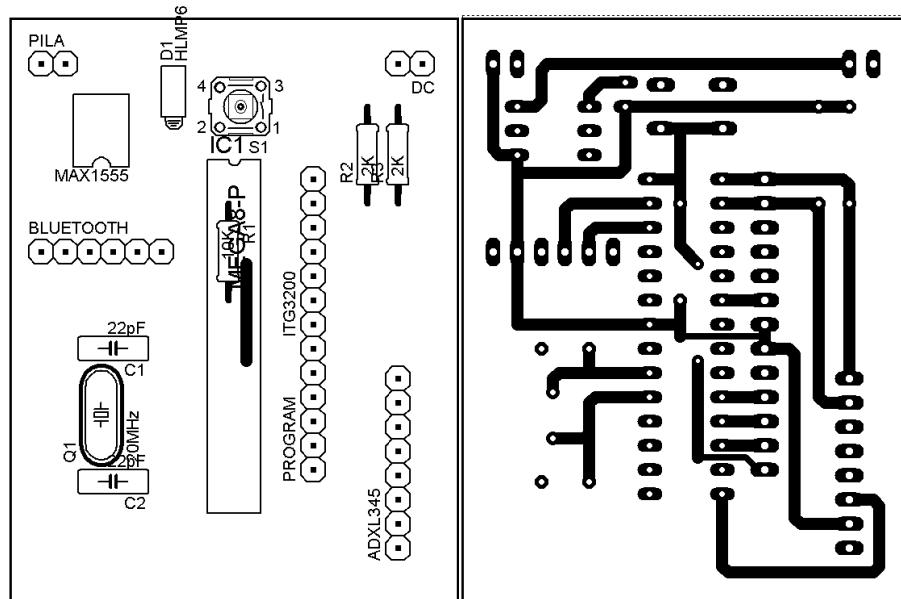


Figura 6.12: Placa de circuito impreso del Atmega48 vista anterior (der.) vista posterior (izq.)

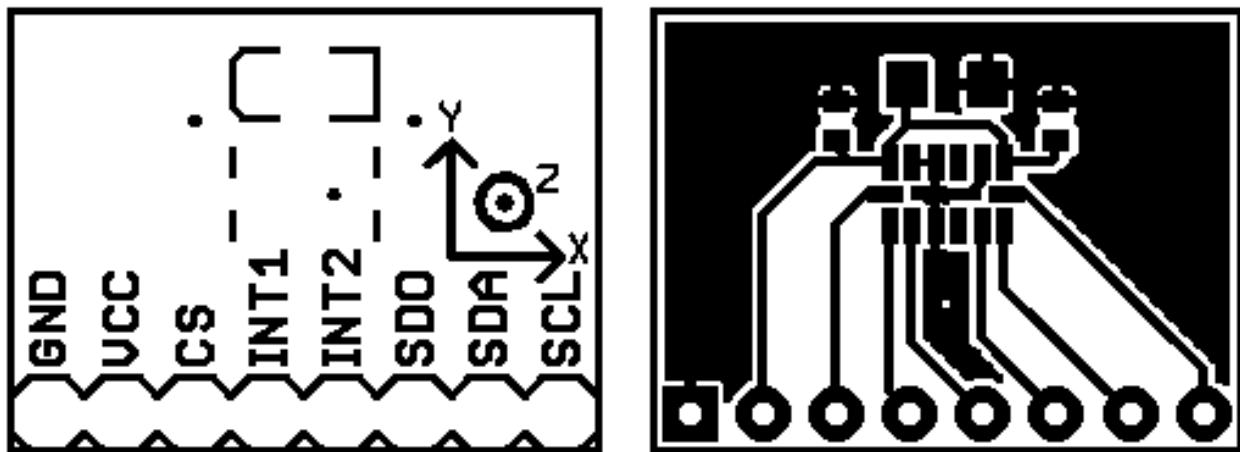


Figura 6.13: Placa del ADXL345 vista anterior (der.) y vista posterior (izq.)

Una vez terminado el diseño de la placa del circuito en Eagle, se procede a la impresión en láser del diseño en una hoja de papel *cuché*, después por transferencia de calor se traspasa el diseño a la placa fenólica, en seguida se ataca la placa con cloruro férrico, el resultado del proceso químico anterior es el circuito final de la placa base. Una vez concluido esto, se perforan con taladro los lugares destinados para los receptores de los sensores iniciales, el módem Bluetooth, así como los componentes electrónicos: resistencia, led's, conectores de corrientes y botón switch. Por último se soldan los componentes electrónicos. Con esto el sistema de medición electrónico está listo para realizar las primeras pruebas de transmisión inalámbrica.

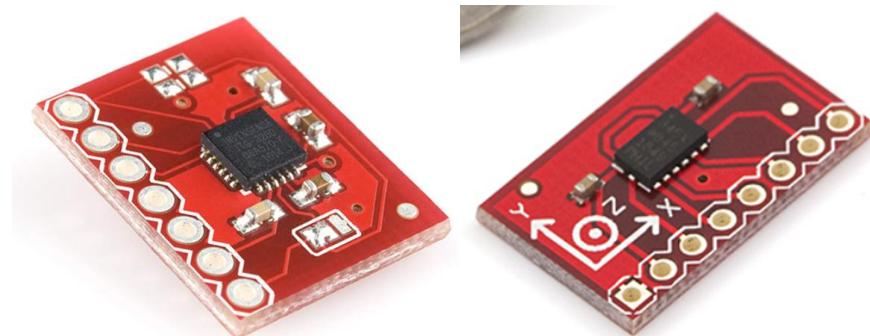


Figura 6.14: Fotografía del ITG-3200 (izq.) y ADXL-345 (der.) [82][83]

El resultado de la unidad inercial completa se muestra en la [Figura 6.15](#).

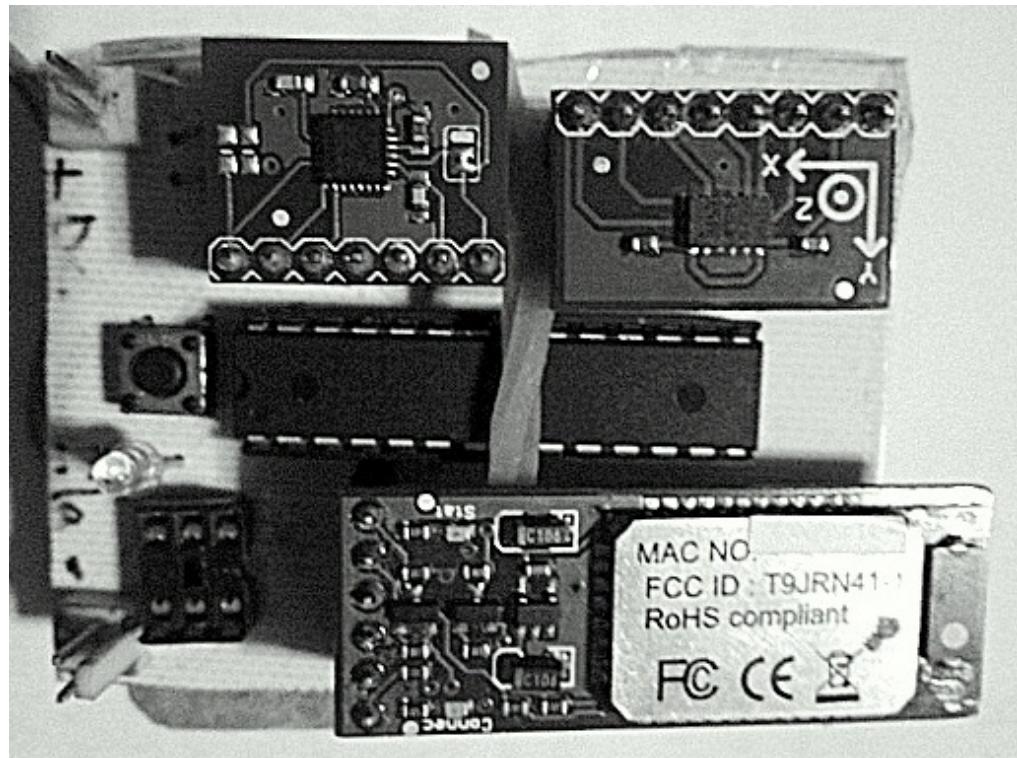


Figura 6.15: Fotografía del sistema de medición terminado

6.2.3. ETAPA C.- Programación del microcontrolador

Antes de desarrollar el algoritmo en el AVR se requiere entender la comunicación de los sensores, debido a que estos utilizan el protocolo de comunicación I^2C . Cuando se trabaja con lecturas de datos en dispositivos I^2C la petición de los datos, se realiza por consulta (*polling*) o por interrupciones. El Polling es una consulta constante hacia un dispositivo de hardware para crear una actividad sincrónica, sin el uso de interrupciones, en cambio la interrupción es una señal recibida por el microcontrolador, indicando que debe "interrumpir" el curso de ejecución actual y pasar a ejecutar código específico para tratar esta situación. El sistema desarrollado utiliza la lectura de los sensores por consulta o *polling*. La aplicación de la computadora manda una señal al microcontrolador pidiendo un paquete de datos, para este caso dicha señal es el carácter '@', el microcontrolador responde a la petición entregando a la aplicación.

En la programación del código del AVR se considera información que provee el fabricante en las hojas de especificaciones de los sensores. la primera es la sensibilidad y la segunda es el offset de la señal. La sensibilidad es la razón entre el incremento de la señal de salida o de lectura y el incremento de la variable que lo ocasiona, después de haberse alcanzado el estado de reposo. La información de los sensores presenta un *offset*, el cual se filtra programando una rutina que obtiene el promedio de 100 muestras en estado estacionario y se resta este valor a las medidas del sensor. El ruido que presenta la señal es atenuado aplicando un filtro digital, considerando las hojas de datos del fabricante se aprecia que a 100Hz se conserva un bajo nivel de ruido. por lo que se sintoniza el filtro pasa bajas interno del sensor en esta frecuencia [69]. En la [Figura 6.17](#) se presenta el diagrama de flujo del código programado interno del microcontrolador Atmega 48.

Para realizar la programación del microcontrolador se identifican las terminales *RST* (*Reset*), *MOSI*, *MISO*, *SCK*, *GND* y *VDD*. Después se empalma cada pin del programador con el del microcontrolador y entre la línea de *RESET* y *Vcc* se debe colocar una resistencia de 10 KOhms, observe la conexión que se muestra en la [Figura 6.16](#). Es necesario conectar un cristal externo de 20MHz durante la programación del microcontrolador. El programador utilizado tiene el identificador USBASP, el cual realiza la programación mediante el programa AVRDUDE desde el símbolo del sistema, se posiciona a la ruta donde se encuentra el archivo *.hex* generado por el programa MikroC, finalmente se prosigue a escribir la siguiente línea para grabar el código de programación:

```
avrdude -c usbasp -e -u -U flash:w:ttFeb.hex
```

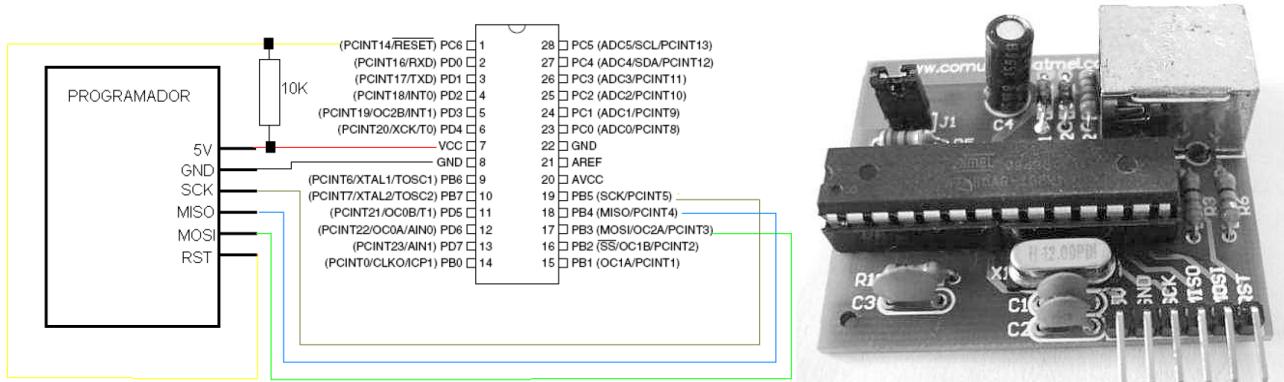


Figura 6.16: Conexión del programador con AVR (izq.) y Fotografía del programador (der.) [95].

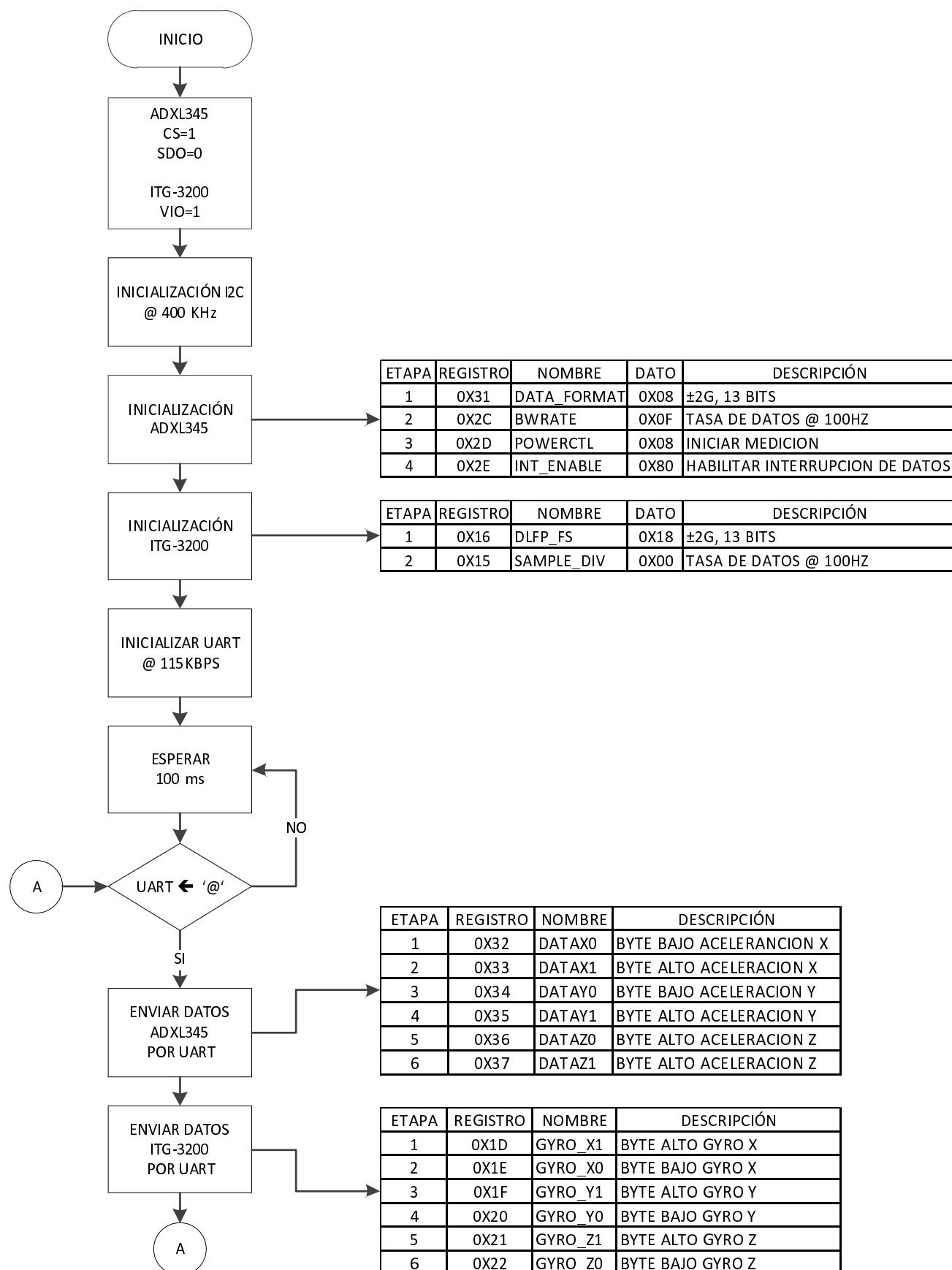


Figura 6.17: Diagrama de flujo del programa interno del microcontrolador Atmeg48

6.2.4. ETAPA D.-Realización de pruebas y validación

Para garantizar la confiabilidad de la información se requiere de un proceso de validación. Los elementos que son sometidos a este proceso son los sensores iniciales acelerómetro, giróscopo y la comunicación inalámbrica. En el caso de la adquisición de los datos se emplea el canal de comunicación inalámbrico propio de la unidad inercial con el puerto serial lo que permite usar la computadora como terminal de trabajo.

En forma predeterminada, el *módem Bluetooth* se muestra en el directorio de dispositivos *Bluetooth* de *Windows* como servicio SPP (acrónimo del inglés *Serial Port Profile* o en español perfil de puertos serie) "*FireFly-ABCD*", donde "*FireFly*" es el tipo de dispositivo y "*ABCD*" son los últimos 4 *nibbles* de la dirección *MAC*. Para emparejar el dispositivo es necesario hacer doble *clic* en el nombre del dispositivo.

Si el dispositivo Bluetooth no requiere autentificación, la conexión puede ocurrir sin el proceso de enlace. Sin embargo la especificación Bluetooth requiere que si cualquiera de los 2 dispositivos involucrados en el proceso de enlace se autentifique, el otro dispositivo debe participar con el fin de garantizar un vínculo seguro. El modo predeterminado del *módem Bluetooth* es modo abierto, de tal manera que el módulo no requiere de este procedimiento. Sin embargo la mayoría de los PC si la solicita.

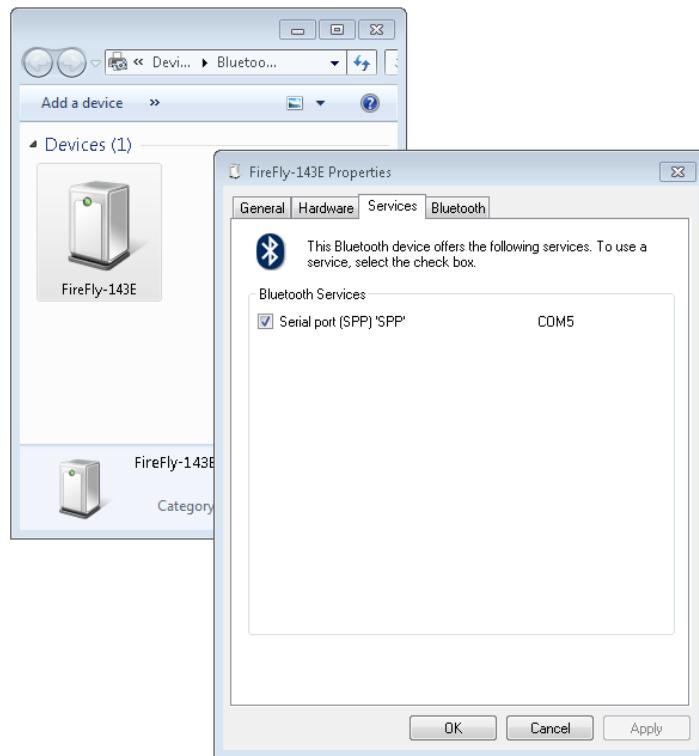
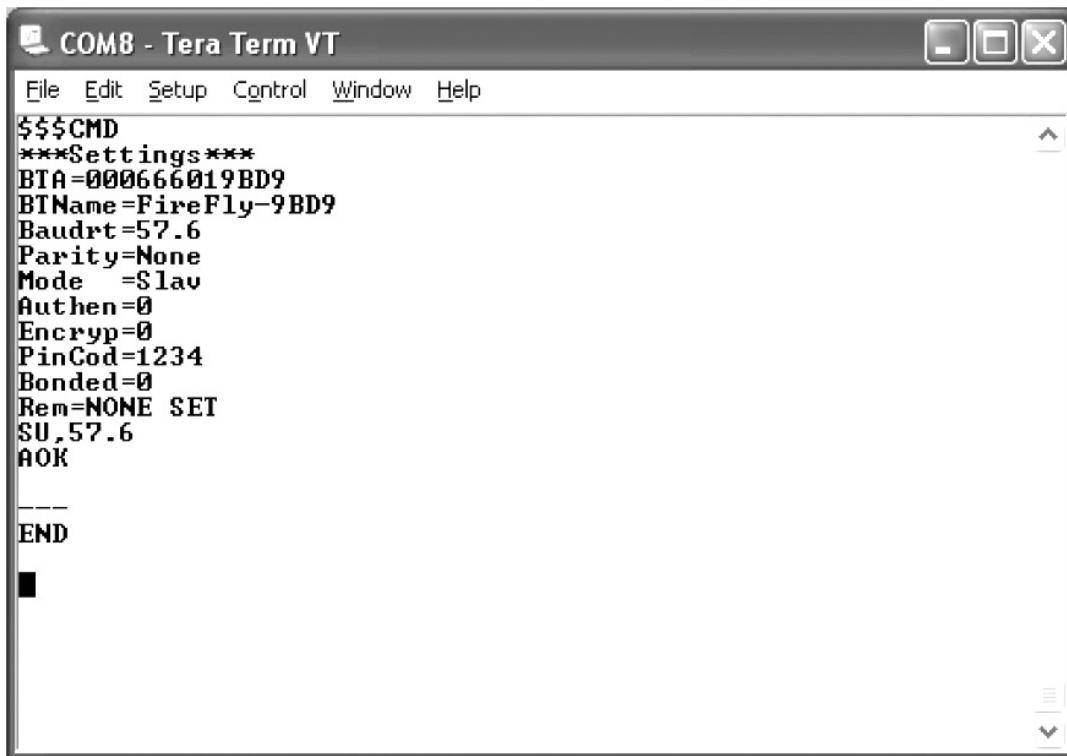


Figura 6.18: Pantallas de dispositivos Bluetooth de Windows

La clave de paso o *pass key* es una cadena de caracteres alfanuméricos, de 1 a 16 caracteres de longitud. Durante el primer proceso de enlace, este código se debe ingresar en ambos lados de la conexión *Bluetooth*, y deben coincidir para completar el apareamiento. Esta clave se utiliza para crear un vínculo seguro-clave, que luego se almacena en ambos dispositivos. En posteriores intentos de conexión, los dispositivos se comparan y debe coincidir con la conexión antes de continuar. La clave maestra o predeterminada es "**1234**".

Para conectarse a *FireFly*, navegue por los servicios, se debe ver: *SSP* perfil con un puerto *COM* virtual. Para abrir este puerto *COM* virtual se crea una conexión *Bluetooth* (ver [Figura 6.18](#)). Una vez conectado, el dispositivo estará en el **modo dato** permitiendo que los datos fluyan en ambas direcciones virtualizando un puerto serie local en el equipo. El dispositivo debe estar en **modo comando** para la configuración y programación. Para poder configurar el módem *Bluetooth* abra una terminal serial configurando el *COM* donde esta conectado *FireFly*, para entrar en modo comando escriba en la terminal " \$\$", si tuvo éxito aparecerá un "CMD" en la terminal y el *led* rojo del módem empezará a destellar rápidamente. Para regresar al **modo dato** escriba en la terminal "—", aparecerá "END" en la terminal y el *led* rojo dejará de destellar (ver [Figura 6.19](#)).



The screenshot shows a window titled "COM8 - Tera Term VT". The menu bar includes File, Edit, Setup, Control, Window, and Help. The main window displays the following text:

```

$$$CMD
***Settings***
BTAddress=000666019BD9
BTName=FireFly-9BD9
Baudrate=57.6
Parity=None
Mode=Slave
Authen=0
Encryp=0
PinCode=1234
Bonded=0
Rem=NONE SET
SU_57.6
AOK

---
END

```

Figura 6.19: Terminal USART mostrando la configuración del módulo Bluetooth

Una vez programado el *AVR* y configurado el *módem Bluetooth*, se prosiguió a realizar el enlace inalámbrico, para realizar la verificación se utilizó una terminal serial y así visualizar los datos enviados por el microcontrolador (ver [Figura 6.20](#)); se observa claramente los 6 ejes con su signo, cada que se envía un '@' usando la terminal, el microcontrolador regresa la señal de los sensores inerciales. La *USART* trabaja a 115200bps, 8 bits sin paridad, con un bit de parada.

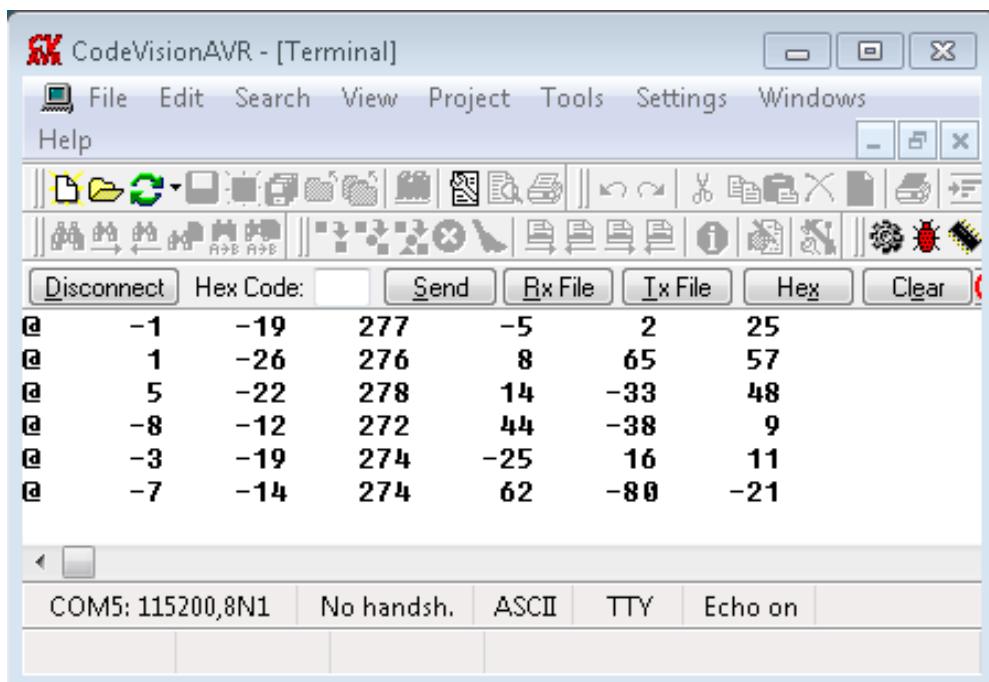


Figura 6.20: Terminal USART recibiendo los datos de los sensores iniciales

El tiempo que tarda un paquete de datos (los 6 ejes) en llegar del IMU a la PC pasando por el microcontrolador, se utilizó el osciloscopio como herramienta de medición. Como se puede observar en la Figura 6.21 el tiempo de muestreo corresponde a 4.3 ms. entre la transmisión de paquetes con información.

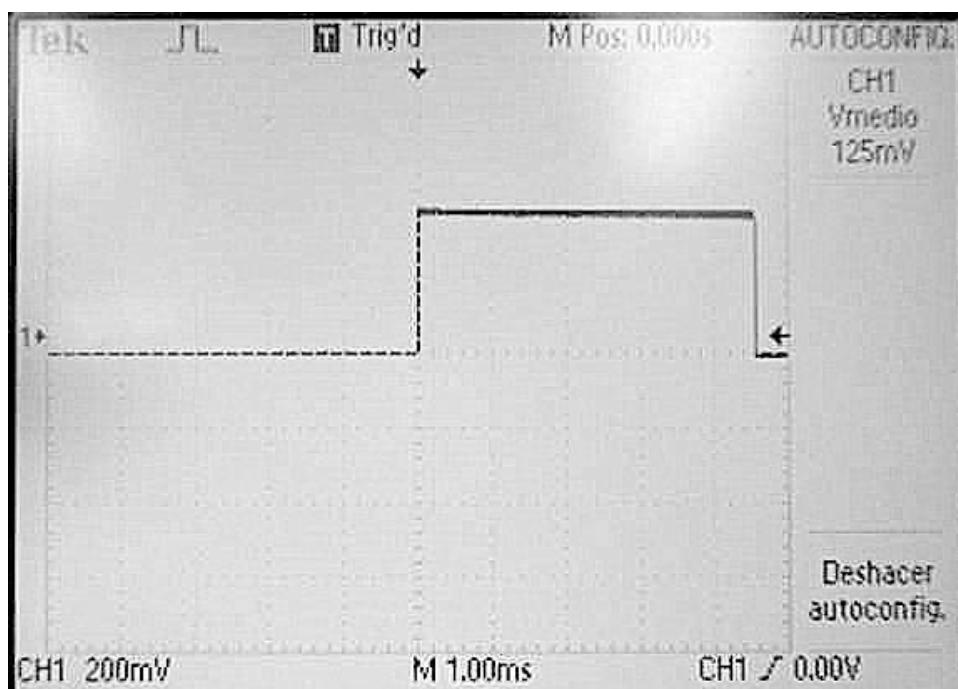


Figura 6.21: Pantalla de osciloscopio mostrando la duración de la $\Delta t = 4.3ms$

Finalmente se hace el proceso de validación para el sensor inercial en el laboratorio de física de la UPIITA, consistió en diseñar un experimento que tuviera como condición inicial **la aceleración constante**. Para conseguir la condición propuesta, se hace uso de elementos del aparato STM-P1.4 Linear Motion, como son el riel neumático , boquilla para bomba de aire, la bomba de aire y el carro de desplazamiento donde se coloca la unidad inercial (ver [Figura 6.22](#)).

Antes de realizar el desarrollo del experimento es necesario establecer condiciones controladas en el mismo con el fin de poder repetirlo, conocer el comportamiento del fenómeno y poder estimar un resultado. Para el experimento se considera la geometría de un triángulo rectángulo con el que es posible determinar longitudes de los catetos e hipotenusa así como ángulos entre catetos lo que proporcionara un control en el fenómeno a estudiar. La construcción de las condiciones de aceleración inicial y control determinada a partir del plano inclinado se realiza de la siguiente forma:

Se coloca un elevador mecánico a su máxima abertura con la finalidad de mantener la longitud que representa la altura del triángulo o cateto opuesto constante. Se monta la unidad inercial en el riel neumático y se fija la distancia al posicionar la parte final del mismo(ver [Figura 6.22](#)). Se mide la distancia después de haber fijado la parte final del riel respecto al elevador mecánico (ver [Figura 6.22](#)).

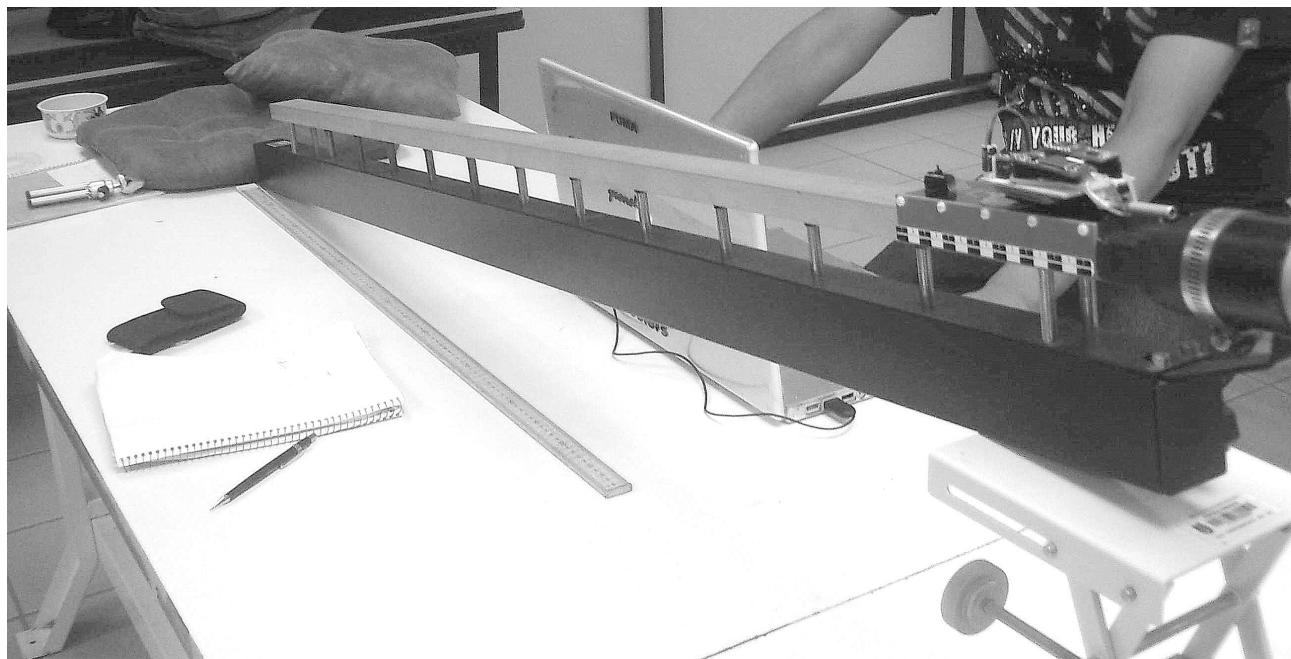


Figura 6.22: Medición de la longitud

Con las medidas de ambos catetos proporcionadas con el elevador y el punto final del riel se calcula el ángulo de elevación del plano, para corroborar ese ángulo y agregar confiabilidad en el experimento se hace la medida con un transportado (ver [Figura 6.23](#)).

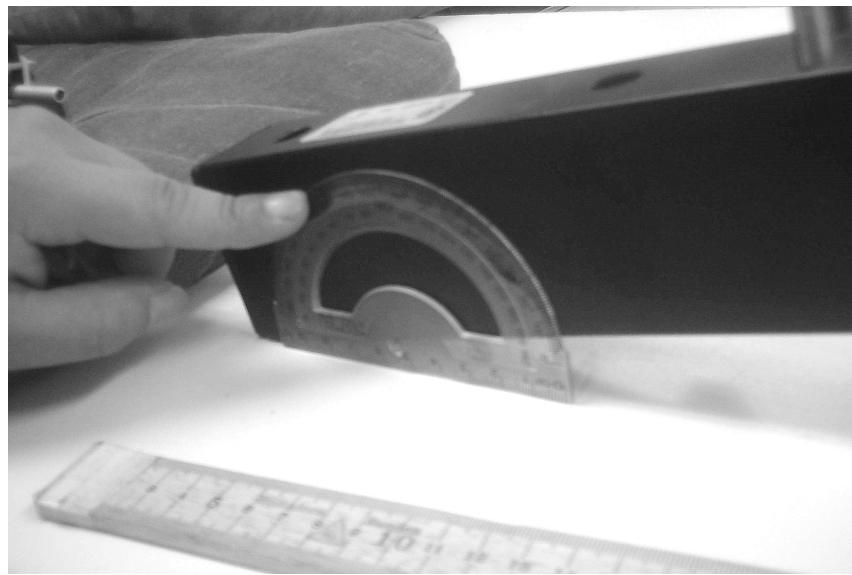


Figura 6.23: Medición del ángulo de elevación para el plano

Una vez establecidas las condiciones de control del experimento se busca satisfacer la condición de aceleración constante para ello se requiere conectar la boquilla de la bomba de aire al principio del riel neumático para reducir la fricción (ver [Figura 6.24](#)). El otro extremo de la boquilla se conecta a la bomba , finalmente el sistema armado es (ver [Figura 6.24](#)).

Satisfechas las dos condiciones se procede a realizar la experimentación, esta consiste en colocar sobre el punto superior del riel el carro con la unidad inercial, prender la bomba de aire y soltar el móvil para adquirir la información en su movimiento por el riel considerando el eje del acelerómetro a estudiar (ver [Figura 6.24](#)).

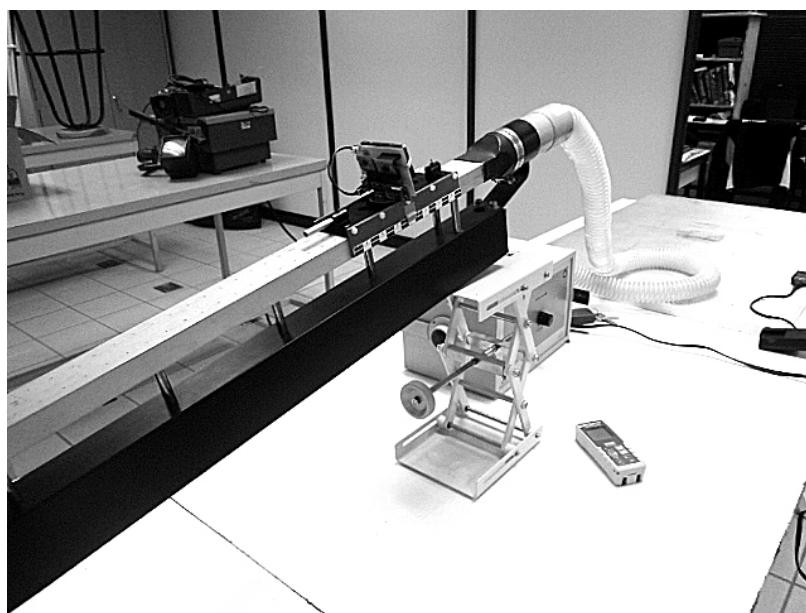


Figura 6.24: Experimento armado y listo para usar

6.3. Software de aplicación

En esta sección se detalla la metodología empleada en el desarrollo del *software* de aplicación, se explican sus componentes necesarios para su integración, como son el código fuente, el controlador de dispositivo, el modelo 3D y la interfaz gráfica de usuario o GUI. Antes de empezar se explica que es un sistema informático aclarando su relación con el software de aplicación. En la [Figura 6.25](#) se muestra un diagrama a bloques del software de aplicación a desarrollar.

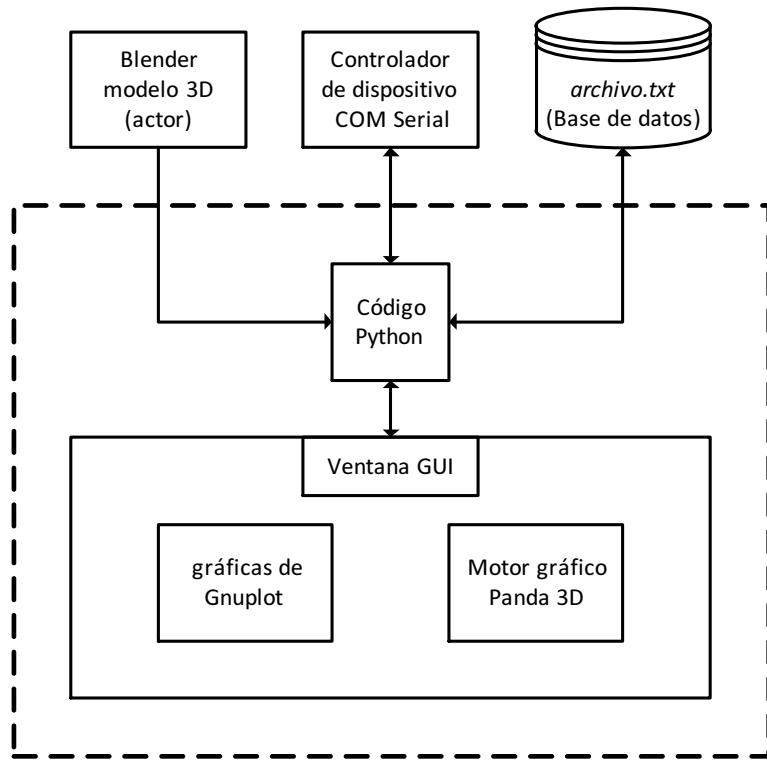


Figura 6.25: Diagrama a bloques de elementos que conforman el software de aplicación

6.3.1. Sistema Informático:

Un sistema informático se define como el conjunto de partes interrelacionadas, *hardware*, *software* y recurso humano o usuario (*liveware*). En concreto la computadora personal o PC, junto con la persona que lo maneja y los periféricos que los envuelven forman un sistema informático. El *hardware* incluye una o varias CPU, memoria, sistemas de almacenamiento externo, etc. El *software* incluye al sistema operativo, firmware y aplicaciones, siendo especialmente importante los sistemas de gestión de bases de datos. Por último el soporte humano incluye al personal técnico (analistas, programadores, operarios) que crean y/o mantienen el sistema y a los usuarios que lo utilizan.

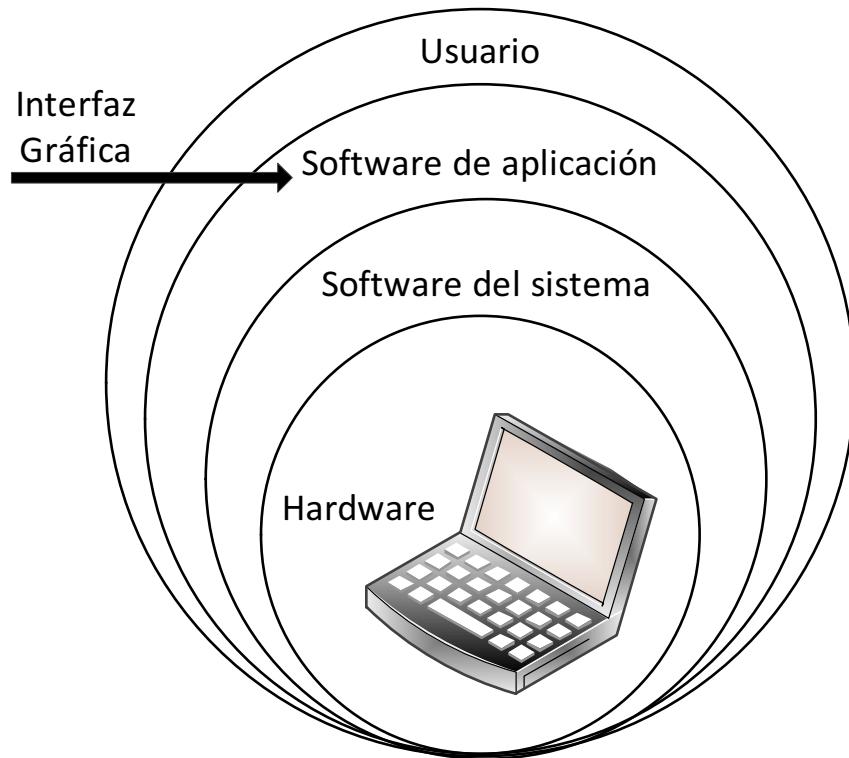


Figura 6.26: Vista organizacional del sistema informático

El *Software* es un conjunto de instrucciones de programa detalladas que controlan y coordinan los componentes *hardware* de una computadora y controlan las operaciones de un sistema informático. La programación es el proceso de escritura de un programa. Existen varios tipos de *software*:

Software de sistema: Gestiona los recursos de la computadora, tal como el procesador central, enlaces de comunicación y dispositivos periféricos. En esta sección se encuentra el **sistema operativo** y el **controlador de dispositivo**.

- Sistema operativo (OS): Permite una administración eficaz de los recursos de *hardware* y *software*.
- Controlador de dispositivo: Permite al sistema operativo interactuar con un periférico haciendo una abstracción del hardware y proporcionando una interfaz estandarizada para usarlo.

Software de programación: Es el conjunto de herramientas que permiten al programador desarrollar programas informáticos, usando diferentes alternativas y lenguajes de programación, de una manera práctica. En esta sección se encuentra el **editor de texto** y el **intérprete**

- Editores de texto: Permite crear y modificar archivos digitales compuestos únicamente por texto plano (sin formato), se usan cuando se deben crear o modificar el código fuente de algún programa.

- Intérprete: Permite analizar y ejecutar otros programas, escritos en un lenguaje de alto nivel. Los intérpretes sólo realizan la traducción a medida que sea necesaria, típicamente, instrucción por instrucción, y normalmente no guardan el resultado de dicha traducción.

Software de aplicación: Es aquel que permite a los usuarios llevar a cabo una o varias tareas específicas, en cualquier campo de actividad susceptible de ser automatizado o asistido, procurando la asistencia y facilidad en dicha operación.

La interacción del usuario con la computadora es controlada por el *OS* a través de una ***GUI*** (acrónimo del inglés *Graphical User Interface* o en español Interfaz Gráfica de Usuario). El *OS* hace posible que el programador pueda introducir y grabar nuevos programas así como instruir a la computadora para que los ejecute. El código fuente es el algoritmo escrito en un lenguaje de programación particular.

El *hardware* es el conjunto de los componentes que integran la parte material de una computadora, corresponde a todas las partes tangibles como son los componentes eléctricos, electrónicos, elektromecánicos y mecánicos, los cables, gabinetes o cajas, periféricos de todo tipo y cualquier otro elemento físico involucrado.

6.3.2. Configuración del sistema:

Se hace referencia a todo lo necesario para el desarrollo del *software de aplicación*, desde la instalación de los programas necesarios, el sistema operativo, y las características de la computadora a utilizar. A continuación se detalla cada una de estas partes:

Cuadro 6.10: Configuración del sistema informático

Hardware:	Software:
Macbook Pro 17 v3.1	Windows 7 Enterprise de 32bits (OS)
Intel Core2Duo @ 2.4Ghz	PyPE 2.8 (Editor)
4GB RAM	Python 2.5 (intérprete)
160 Gb Disco Duro	Panda 3D 1.62 (motor gráfico)
Bluetooth	Blender 2.49 (modelado 3D)

6.3.3. Modelo 3D

Para el desarrollo la parte visual correspondiente al usuario se requiere construir un modelo 3D que represente al atleta y remoergómetro los cuales serán exportados y cargados como **actores** por el motor gráfico.

En la elaboración del avatar del atleta de remo bajo techo, primero se procede a la creación de un cuerpo humano que es el cascarón o malla del avatar, después se requiere la construcción de un esqueleto o estructura conformada por eslabones o huesos para que se puedan representar las articulaciones a estudiar.

Las armaduras (*armatures*) son el elemento básico para deformar y animar un personaje hecho de polígonos. Son la estructura o esqueleto del personaje y están compuestos de elementos menores llamados huesos (bones) que pueden ser configurados de distintas maneras. Los huesos en Blender nos ayudan a poner en distintas posiciones a nuestros modelos en animaciones

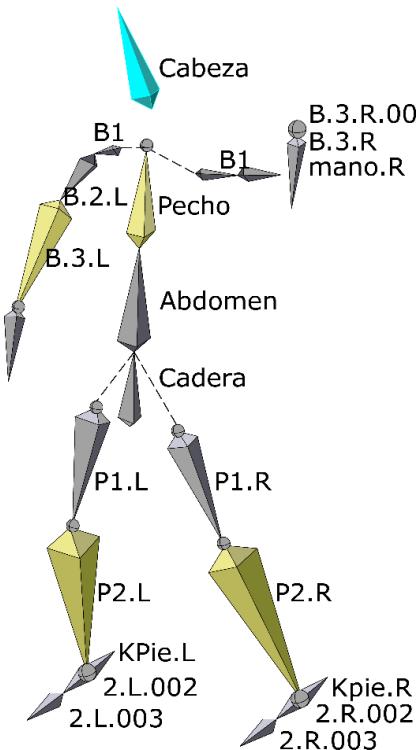


Figura 6.27: Esquema de una armadura humana hecha en Blender

El proceso de creación y configuración de una armadura es conocido como **rigging** del personaje. Una vez creada servirá para变形 la malla del personaje. Para que esto ocurra se debe relacionar de alguna manera el esqueleto con la malla, a esto se conoce como **skinning**.

Para crear una armadura en Blender hay que construir un objeto primero. En el modo de objetos:

- Presionar la barra espaciadora sobre la ventana de vista 3D.
- Seleccionar Add->Armature

Esto nos creará la armadura con un hueso con el cual podemos empezar nuestro trabajo. En el modo de objetos, con el botón de editar activado (F9), nos presentará además un panel "Armature" en la ventana de botones. En este panel podemos establecer varias configuraciones útiles como mostrar los nombres de los huesos o que estos se vean siempre (usando el botón X-Ray).

De esta manera se crea un hueso inicial y el programa entra en **Modo Edición** automáticamente. A partir de allí, se pueden seguir añadiendo huesos sosteniendo la tecla **CTRL** y haciendo click en la pantalla. De esta manera el hueso se generará "unido" al anterior formando una cadena. Como todo objeto en Blender, el objeto armadura tiene también sus ejes. Se debe asegurar que siempre estén alineados a los ejes globales. Las cadenas de huesos se finalizan con la tecla **ESC**. Un hueso tiene una "raíz" y una "cola", que son los puntos extremos del hueso. Todos los huesos comienzan en la "raíz", y luego entonces, la posición de un hueso será referida siempre como la posición de la raíz del mismo.

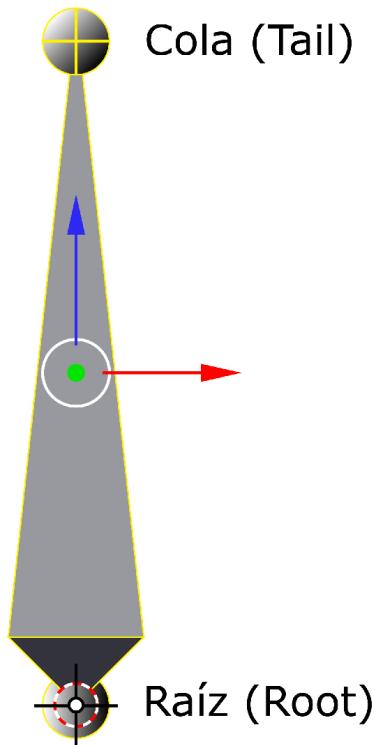


Figura 6.28: Figura de un hueso en Blender y sus partes que lo conforman.

Cada hueso que se crea tiene un nombre único. En los botones de edición se observan otras propiedades de cada hueso. Entre ellas se observa además del nombre, cual es el hueso padre si lo tuviera, si funciona encadenado con otro hueso o bien si está oculto en la vista 3D.

Cada hueso posee su propio sistema de coordenadas (llamadas coordenadas locales), además del sistema de coordenadas globales. Es posible definir rotaciones en estos ejes y a menudo eso será exactamente lo que se hace al animar. Las rotaciones locales de cada eje pueden verse también en el panel Transform Properties.

Para emparentar los huesos a la armadura es necesario indicarle a Blender que vértices son afectados por la acción de cada hueso. Para ello se necesita crear grupos de vértices para cada hueso. Para facilitar el manejo de los grupos de vértices es conveniente ponerles primero nombres a los huesos. Para que Blender cree automáticamente todos los grupos de vértices se hace el siguiente procedimiento en el modo de objetos:

- Seleccionamos la maya y después los huesos.
- Presionamos Ctrl+P.
- Se selecciona Armature.
- Luego Name Groups.

En el modo de edición, seleccionamos los nodos que sean influenciados por cada hueso y se los asignamos al grupo de vértices correspondientes en el panel "Link & Materials". Una vez terminados todos los grupos de vértices, es posible manejar los huesos en el modo de pose que se puede acceder cuando se selecciona la armadura en el modo de objetos.

Con la armadura se consideran 3 maneras de trabajar: Modo Objeto, Modo Edición y Modo Pose. En el modo edición se puede modificar la estructura de la armadura, quitando y agregando huesos, cambiando sus tamaños así como modificar las jerarquías de los mismos. En el modo Objeto, la armadura es considerado como un objeto completo, servirá para operar con el a nivel global. El modo Pose se usa en animación para establecer las "poses" de la armadura a lo largo de la animación.

En la [Tabla 6.11](#) se enlista los huesos con sus nombres referenciados que forman la armadura del modelo 3D:

Cuadro 6.11: Lista de huesos que forman la armadura del modelo 3D

Palm_L (muñeca izquierda)	Palm_R (muñeca derecha)
LowerArm_L (codo izquierdo)	LowerArm_R (codo derecho)
UpperArm_L (hombro izquierdo)	UpperArm_R (hombro derecho)
Shoulder_L (clavícula izquierda)	Shoulder_R (clavícula derecha)
Fingers_L(dedos izquierdos)	Fingers_R (dedos derechos)
Head (Cabeza)	Neck (espalda)
Pelvis (pelvis)	

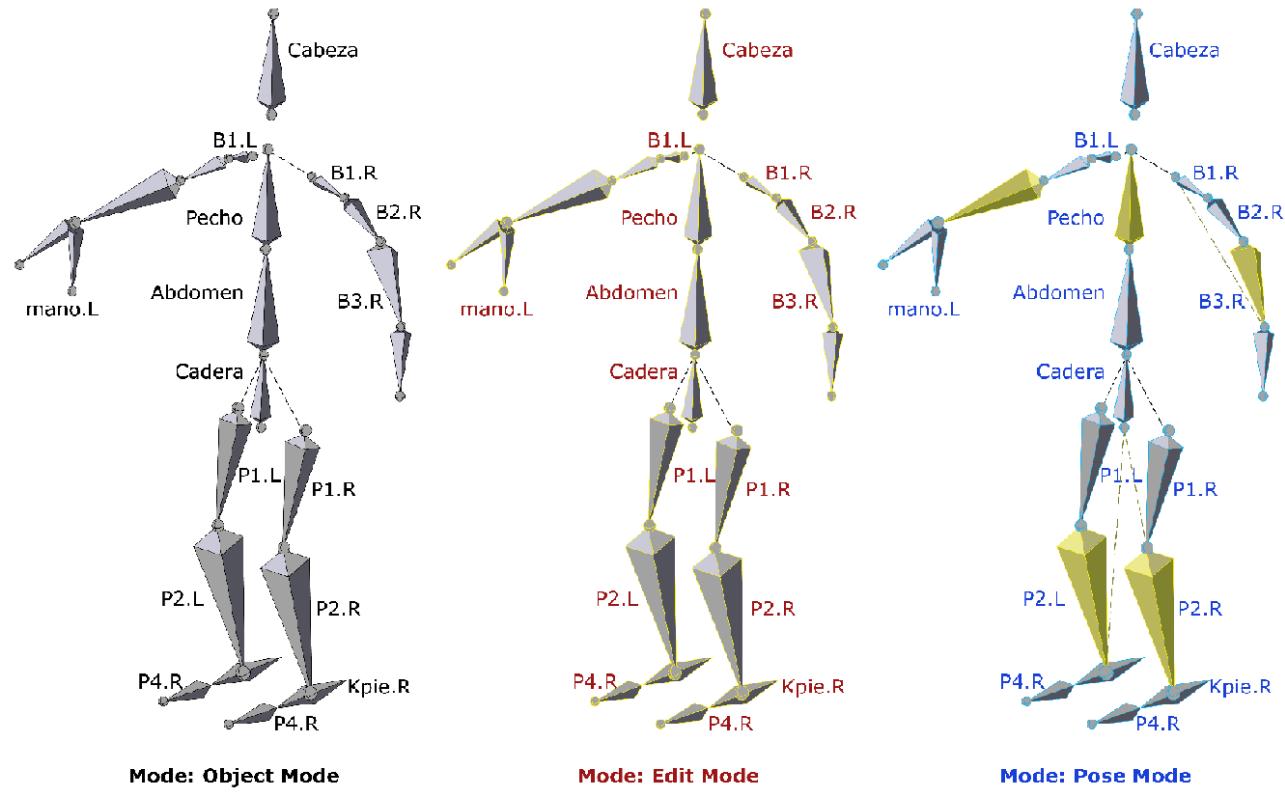


Figura 6.29: Modos de Visualización de la armadura en Blender.

El Modo Objeto, es el modo por defecto, cuando no se este en Modo Edición y no se haya activado el Modo Pose. En todos estos modos, la armadura al igual que cualquier otro objeto puede verse como "Solid" o "Wire", y pueden visualizarse extras como el nombre de objeto o los ejes desde el panel DrawExtra.

Los huesos de las armaduras pueden cumplir distintas funciones y visualizarse de distinta manera. Usar una forma u otra depende de la operación que se requiera con el armature, ya que cada modo ofrece distintas características. Las formas empleadas para el modelo a desarrollar son **octahedro** (la forma de hueso clásica tiene la ventaja de mostrar claramente las rotaciones longitudinales) y **stick** (usado para animar porque visualmente no interfiere, permitiendo ver la malla deformada).

En la [Figura 6.30](#) se muestra el avatar terminado listo para exportarse al motor gráfico Panda 3D. A este punto cabe aclarar que el modelo 3D es solo una maqueta la cual es inanimada, el motor gráfico Panda 3D es el que se encarga de dar la animación cumpliendo una serie de directrices programadas en Python.

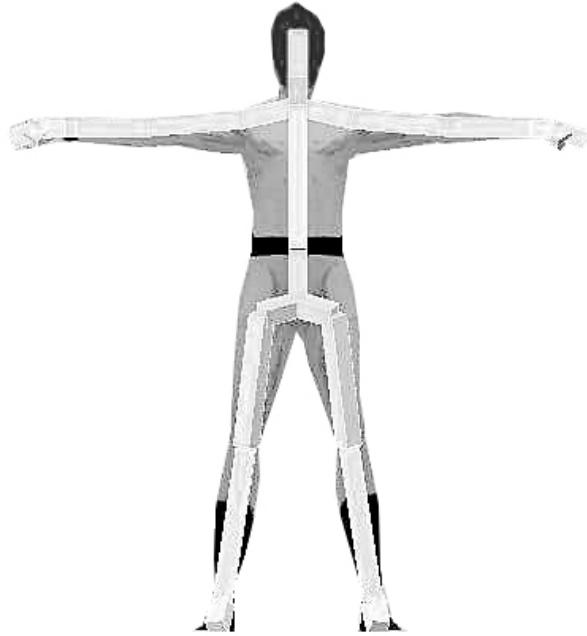


Figura 6.30: Ventana de Blender mostrando el cuerpo del avatar y su armadura terminada

Una vez construidos los elementos gráficos, y combinando la información de la técnica de remo (ver [Tabla 5.2](#)), se sitúa el modelo 3D avatar en la posición correspondiente al inicio de la remada, sobre la máquina donde la ejecuta, de este modo se procede al desarrollo de la animación de un ciclo completo de remada de la técnica correcta. Finalmente se exporta la animación como un archivo de video avi para propósitos demostrativos.

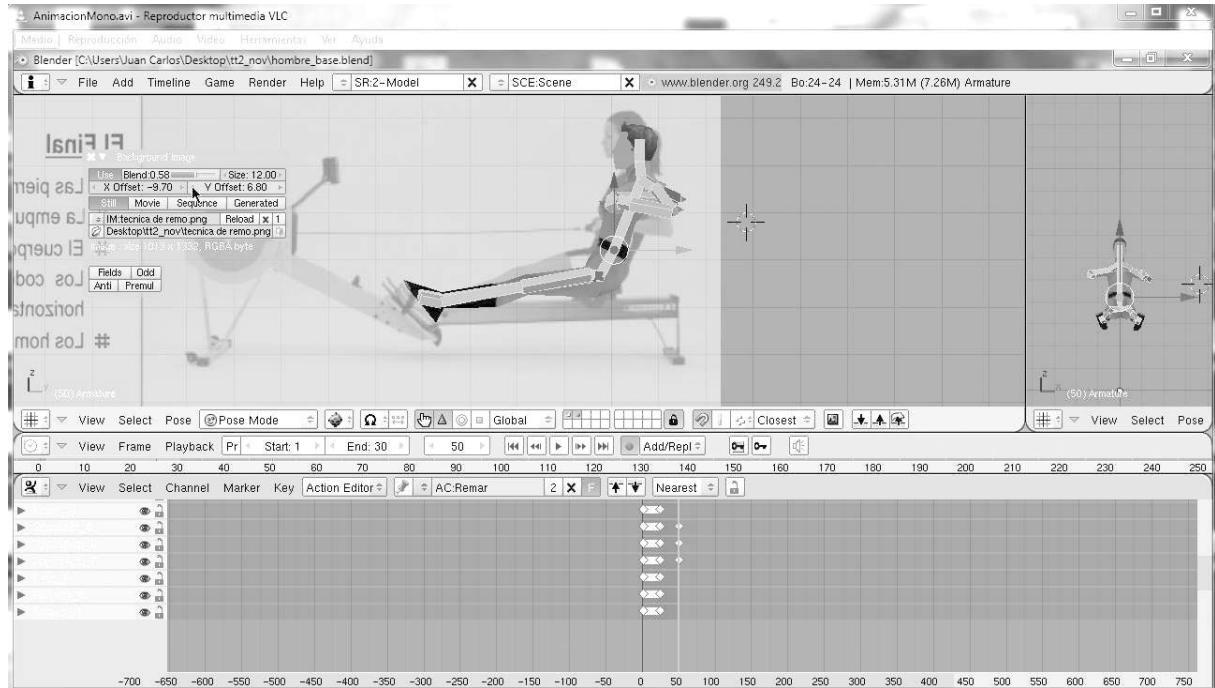


Figura 6.31: Pantalla de Blender realizando el modelo 3D.

6.3.4. Interfaz gráfica de usuario (GUI)

Para el diseño de la interfaz gráfica se procede a diseñar un algoritmo que procesa e interpreta la señal recibida por los sensores para ser implementado sobre un modelo 3D (avatar), específicamente en la articulación estudiada utilizando el motor gráfico PANDA 3D. Además se construye una animación con los datos proporcionados por la compañía CONCEPT II con el propósito de mostrar la técnica de remo correcta.

6.3.5. Base de datos

Una base o banco de datos es un conjunto de elementos pertenecientes a un mismo contexto y almacenados sistemáticamente para su posterior uso. Los datos son representaciones simbólicas (numérica, alfabética) de atributos o características de una entidad. Se considera que las bases de datos utilizadas para el software de aplicación a desarrollar es de tipo estático por ser de sólo lectura. La finalidad de almacenar datos de los sensores iniciales es tener un registro histórico para estudiar su comportamiento a través del tiempo. El código escrito en Python hace un llamado al programa Gnuplot que utiliza la base de datos para su posterior graficación.

6.3.6. Código del programa

Durante esta etapa se realiza programación, codificación (implementación); que consiste en llevar a código fuente, en el lenguaje de programación elegido (Python), el desarrollo del modelo 3D y la GUI. Esta tarea se realiza, siguiendo los lineamientos impuestos en la Especificación de Requisitos de Software (ERS). Mientras se programa la aplicación, se realizan las tareas de depuración, que consiste en liberar al código de errores de semántica, sintáctica y lógica. Para depurar la lógica se requiere realizar pruebas unitarias, con datos de prueba. Los errores funcionales (mala respuesta a los requerimientos) exige retornar a la fase de diseño antes de continuar la codificación. Durante la fase de programación, el código de programación adopta 2 estados:

Código fuente: es el escrito directamente por los programadores en editores de texto, lo cual genera el programa. Contiene el conjunto de instrucciones codificadas en lenguaje de programación de alto nivel **Python**.

Código objeto: es el código binario o intermedio resultante de procesar con un compilador el código fuente. Consiste en una traducción completa y de una sola vez de éste último. El intérprete se encarga de traducir y ejecutar cada línea del código fuente de acuerdo al flujo del programa, en tiempo de ejecución. Esta forma de trabajo facilita la tarea de depuración del código fuente frente a la alternativa de hacerlo con un compilador puro.

Para una consulta detallada revisar el Apéndice C, D y E donde se encuentra el código del programa en Python empleado para el desarrollo del software de aplicación.

Capítulo 7

Análisis e interpretación de resultados

7.1. Modelo Biónico

Los resultados obtenidos al introducir las tablas de parámetros de Denavit-Hartenberg correspondientes a la columna y los brazos en el software MATLAB específicamente la herramienta Robotics Tool Box y consideran las $q's=0$ (ver) se puede comprobar la tabla de parámetros propuestas:

Cuadro 7.1: Tabla de Parámetros Denavit-Hartenberg para el brazo izquierdo y derecho.

Eslabones	zi		xi		Eslabones	zi		xi	
n	ϑ_i	d_i	a_i	α_i	n	ϑ_i	d_i	a_i	α_i
1	0	l_1	0	0	1	0	l_1	0	π
2	$\pi/2+q_1$	0	0	$\pi/2$	2	$-\pi/2+q_1$	0	0	$-\pi/2$
3	$\pi/2+q_2$	0	0	$\pi/2$	3	$-\pi/2+q_2$	0	0	$-\pi/2$
4	$\pi/2+q_3$	r_1	0	$-\pi/2$	4	$-\pi/2+q_3$	r_1	0	$-\pi/2$
5	$-\pi/2+q_4$	0	r_2	0	5	$\pi/2+q_4$	0	r_2	0
6	q_5	0	r_3	0	6	q_5	0	r_3	0

Cuadro 7.2: Tabla de Parámetros Denavit-Hartenberg de la columna

Eslabones	z_i		x_i	
n	ϑ_i	d_i	a_i	α_i
1	0	0	r_1	0
2	q_1	0	r_2	0
3	q_2	0	r_3	0
4	q_3	0	r_4	0
5	q_4	0	r_5	0

Las tablas anteriores son ingresadas por medio de comandos específicos de *Matlab* relacionados con el *toolbox robotics*, tiene como finalidad primeramente verificar que la configuración del *robot*

propuesto en los esquemas corresponda a lo planteado, y como segunda tarea hacer una simulación con funciones de prueba como se muestra en las siguientes figuras. Se anexan archivos en CD para su manipulación y un manual de instalación de la herramienta *toolbox*

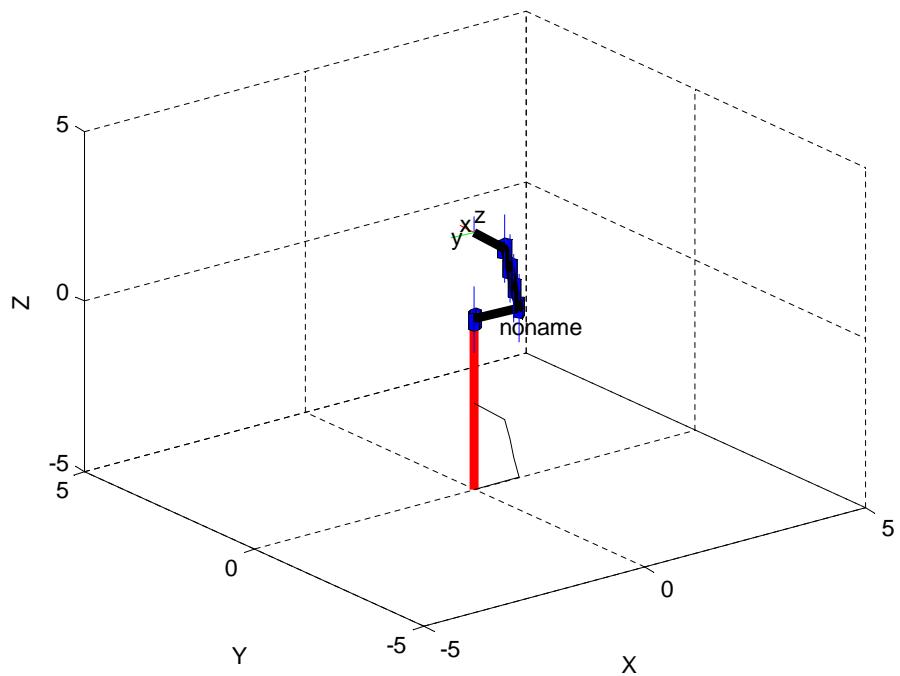


Figura 7.1: Pantalla de simulación de la columna en Matlab

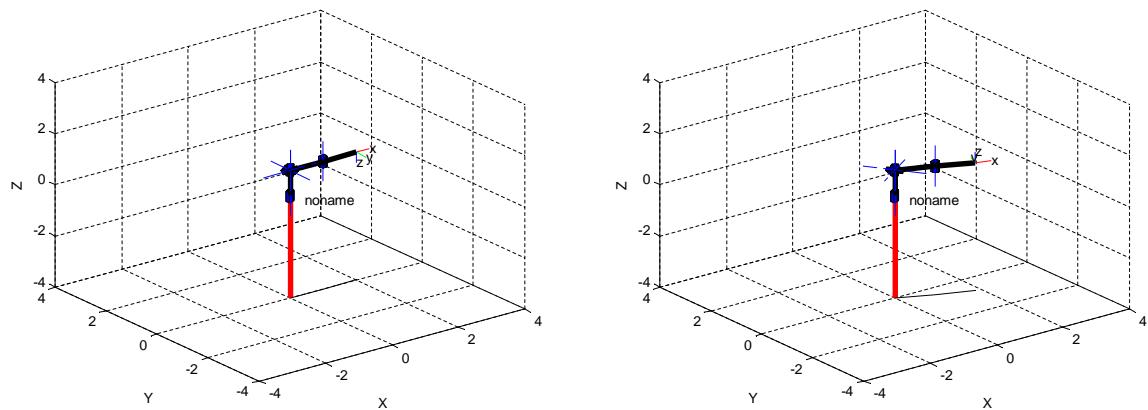


Figura 7.2: Pantalla de simulación del brazo derecho e izquierdo en Matlab

7.2. Sistema de medición

Se verificó el alcance de la **comunicación inalámbrica en espacios abiertos reportando 24 metros como máximo**. Dicha prueba consiste en mantener la transmisión de la unidad inercial e ir alejando el dispositivo de la fuente receptora hasta que la transmisión se interrumpa. Esta prueba se hizo en uno de los pasillos de la UPIITA (ver [Figura 7.3](#)).

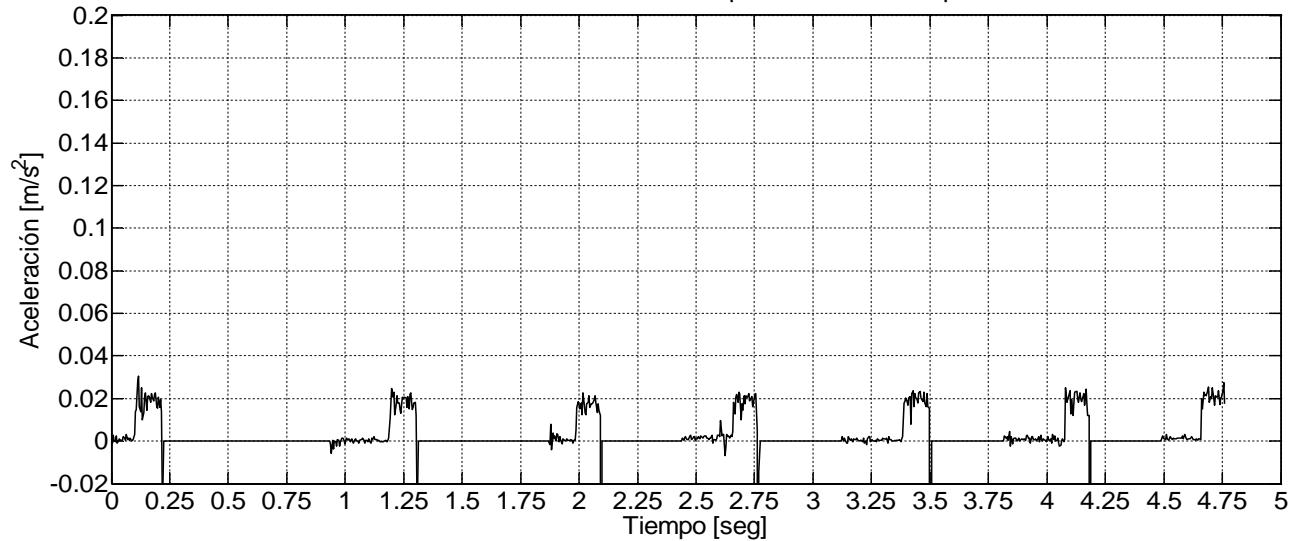


Figura 7.3: Prueba de distancia en la comunicación inalámbrica del sistema de medición

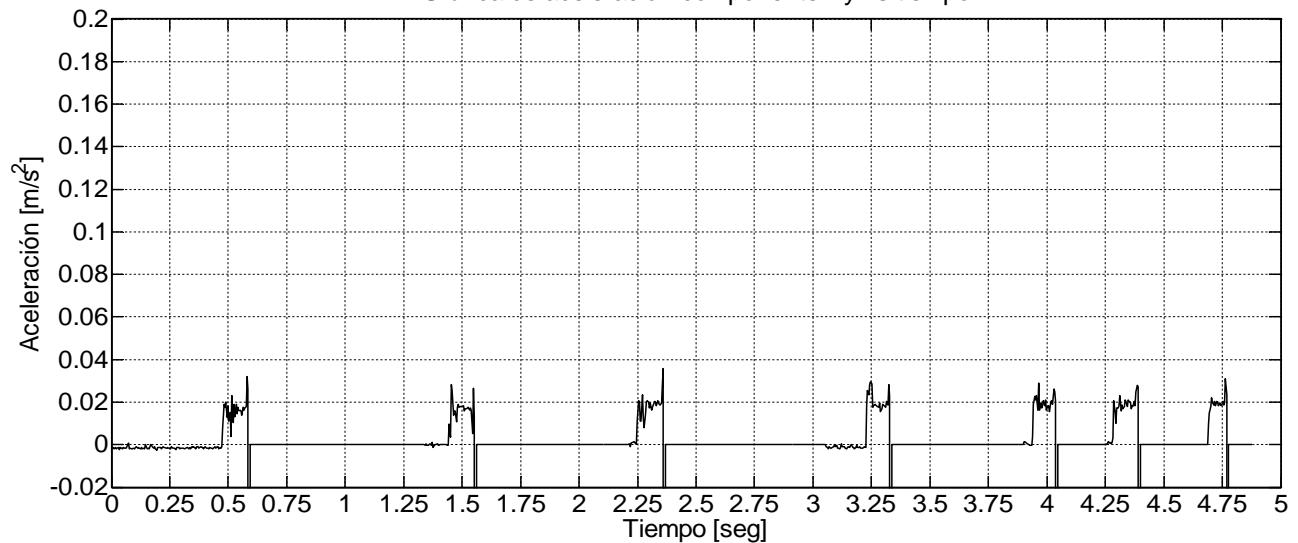
Las gráficas (ver [Figura 7.4](#)) mostradas en esta sección son representaciones del movimiento, no trazos de las trayectorias reales seguidas por el móvil; se muestra la aceleración dinámica separada en sus componentes tomada por el sistema de medición montado sobre el móvil. Se realizaron 7 mediciones para cada eje coordenado de forma continua, la aplicación realizada en Python genera un archivo que guarda los datos de los sensores en un archivo `*.txt`. Posteriormente se trabaja ese archivo en Matlab. Las curvas mostradas presentan el tiempo que el móvil estuvo acelerado.

De las gráficas se observa que el pico de las curvas se estabilizan en un valor promedio de $0.02m/s^2$. La descripción del movimiento del móvil a partir de la gráfica requiere de una introspección física, para obtener una descripción completa del movimiento se requiere conocer la dependencia matemática de la posición x en el tiempo t para todo momento en otras palabras la función $x(t)$. Nótese que las gráficas de la [Figura 7.4](#) tienen 2 características, $x(t)$ no se rompe durante el tiempo de muestreo y la pendiente no tiene puntos agudos. Las gráficas mostradas son representaciones del movimiento, no trazos de las trayectorias reales seguidas por el móvil.

Gráfica de aceleración componente Ax vs tiempo



Gráfica de aceleración componente Ay vs tiempo



Gráfica de aceleración componente Az vs tiempo

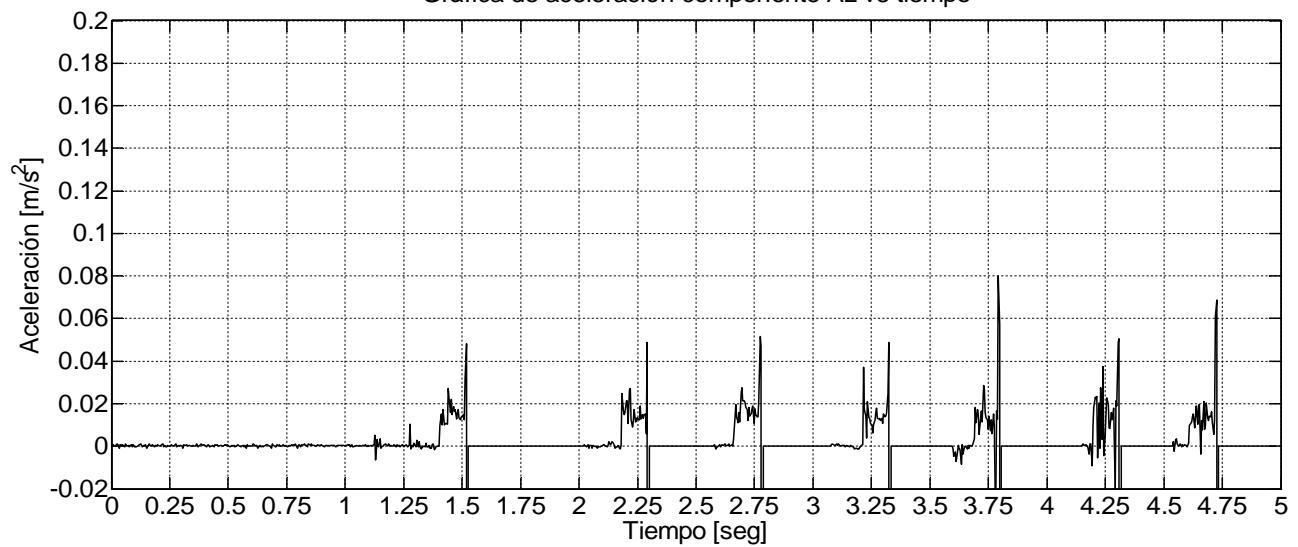


Figura 7.4: Gráfica aceleración vs tiempo componente Ax,Ay y Az

Las pruebas realizadas al club de remo UPIICSA arrojaron como resultados interacción con el entrenador y conocer las necesidades del mismo ver [Figura 7.5](#).

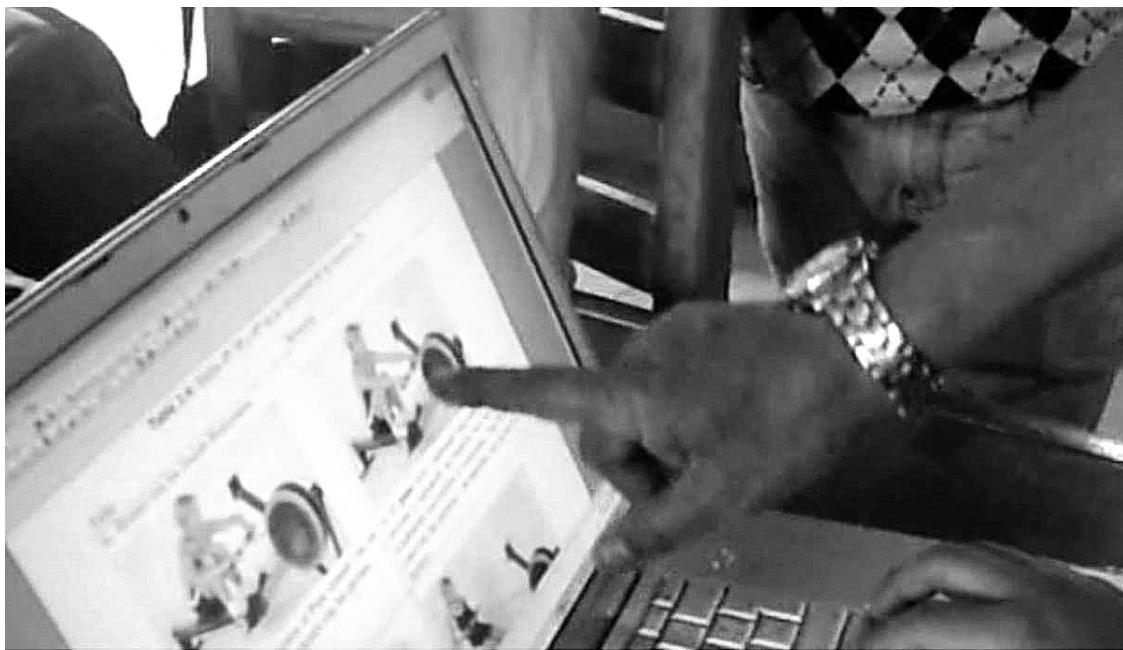


Figura 7.5: Entrenador explicando los puntos de interés en la corrección

En la investigación de campo de la realización de la técnica nos muestra el proceso clásico de evaluación del entrenador y atleta. El entrenador para evaluar la técnica del atleta se auxilia de la observación y de la información que arroja el remoergómetro ver [Figura 7.6](#).



Figura 7.6: Entrenador evaluando la técnica del atleta cualitativamente

Las primeras pruebas del prototipo propuesto en esta investigación se pueden ver en la [Figura 7.7](#), La prueba consistió en montar el sensor en la mano izquierda con la finalidad de enfocarse en la velocidad angular obtenida durante la actividad ver [Figura 7.8](#).



Figura 7.7: Atleta de remo ejecutando la actividad con el instrumento de medición montado en la muñeca izquierda.

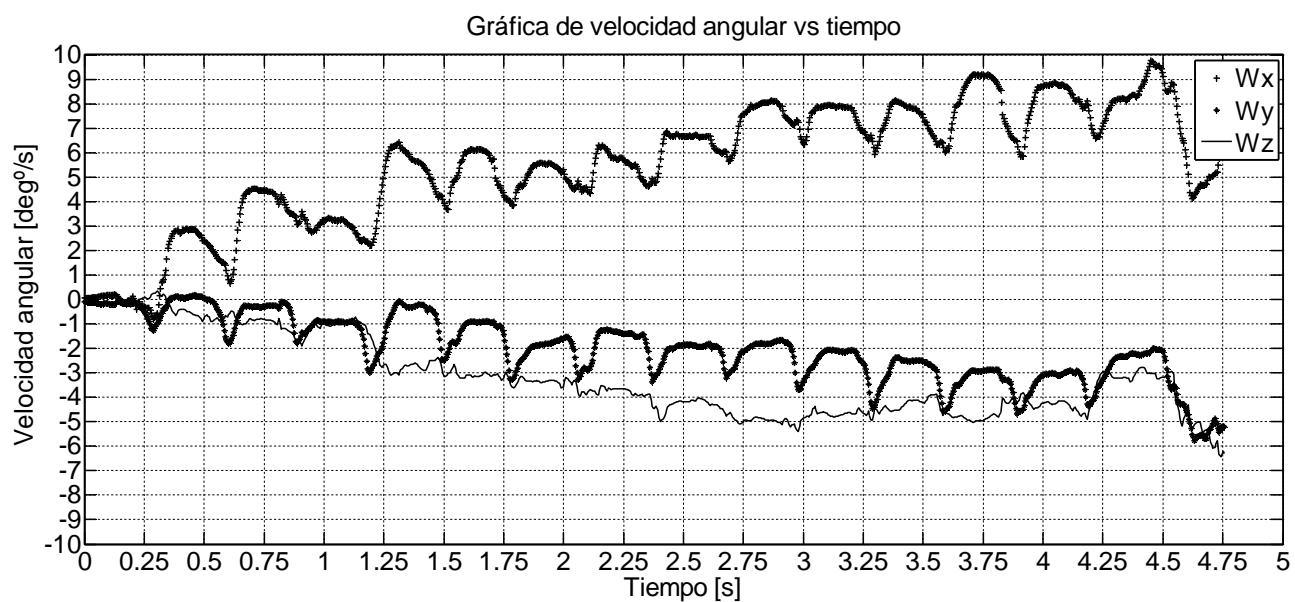


Figura 7.8: Información del sensor capturada en la muñeca izquierda del atleta.

De la gráfica mostrada (ver [Figura 7.8](#)) se observa que las señales están montadas sobre una componente no lineal, para su estudio se procede a filtrar esta componente. Para tratar dichas señales se hace uso de la función `polyfit()` con el fin de realizar un ajuste polinomial de grado n de los datos. Como cada señal (W_x , W_y , W_z) están almacenadas en un vector, la función `polyfit` devuelve el valor de los coeficientes del polinomio interpolante. Posteriormente con la función `polivar()` se puede generar el polinomio de interpolación a partir de los coeficientes encontrados. El polinomio encontrado representa la componente directa sobre la cual va montada la señal de cada vector. Al realizar una resta de la señal con el polinomio de interpolación se obtienen las gráficas de la [Figura 7.10](#). En la [Figura 7.9](#) se detallan los pasos para realizar dicho filtrado, para consultar el código fuente escrito en Matlab que genera estas gráficas consultar el Apéndice A.

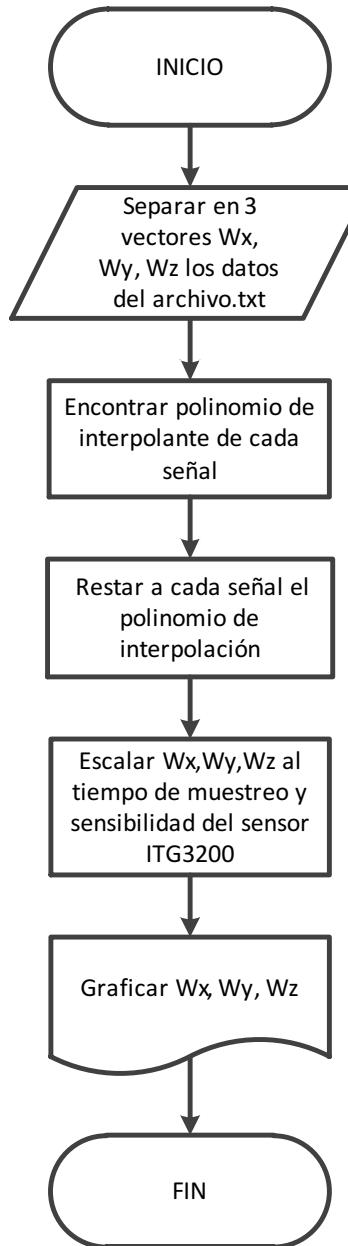


Figura 7.9: Diagrama de flujo del programa escrito en Matlab

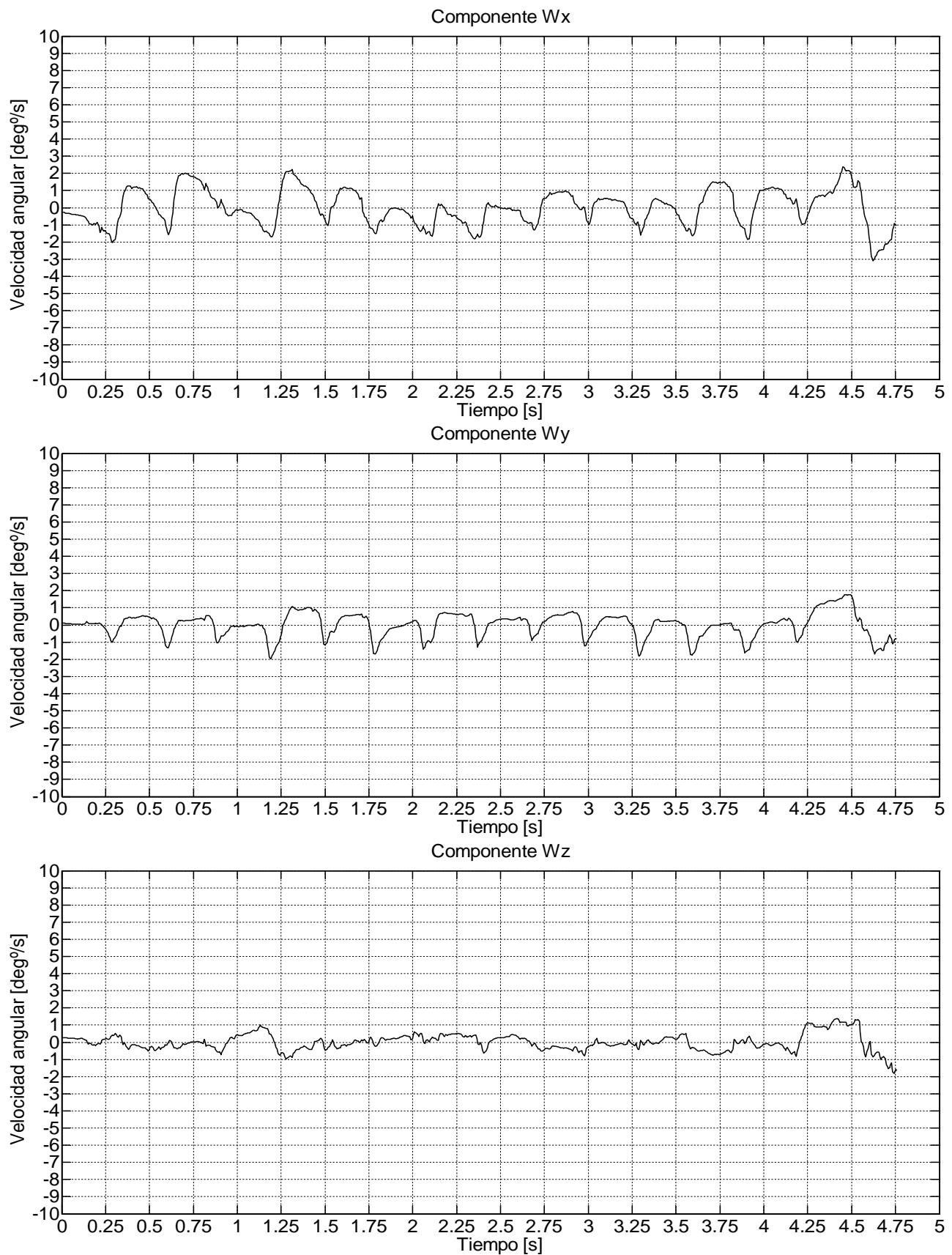


Figura 7.10: Señales de velocidad angular separadas y filtradas

7.3. Interfaz gráfica

Finalmente se presenta una pantalla de la animación final donde se observa las fases del ciclo de remo de manera continua, ejemplo de ello es la [Figura 7.11](#) (ver animación anexa en el Disco). El modelo 3D desarrollado es la parte visual del software de aplicación en la que se muestra de forma clara y comprensible para el entrenador y el atleta el comportamiento cinemático del ciclo de remo. En el modelo 3D es observable la técnica correcta, el cual integra los elementos detallados en el capítulo 6.3.

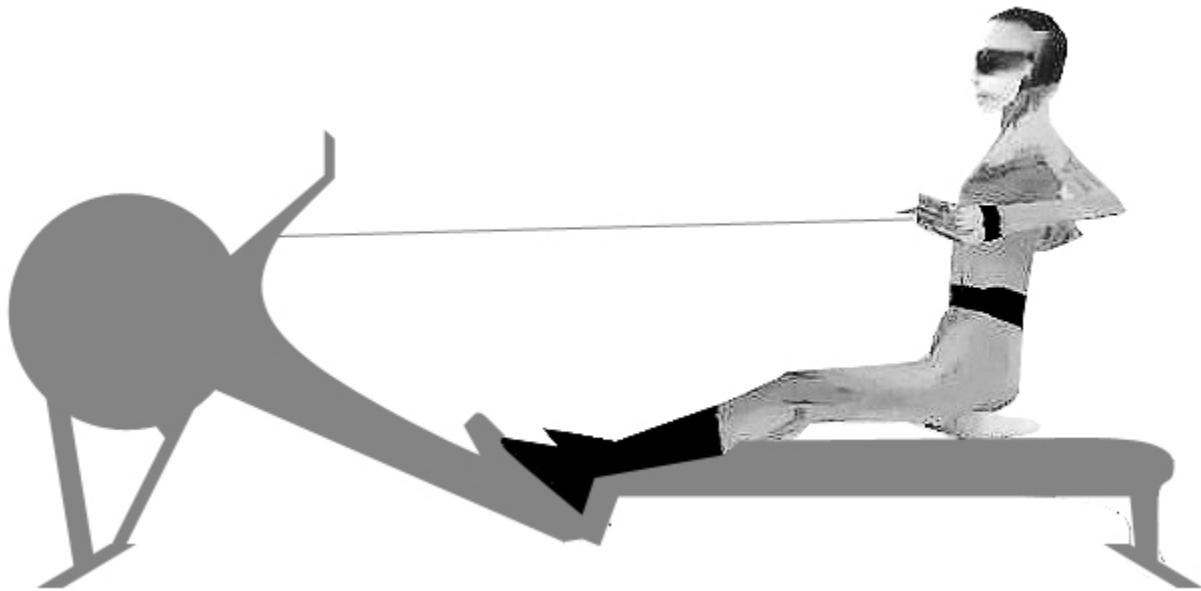


Figura 7.11: Modelo 3D de la ejecución de la técnica sobre remoergómetro.

Capítulo 8

Conclusión

Se describió la técnica de remo bajo techo y su enfoque ergonómico para el mejor desempeño del usuario en una máquina fija. Para ello fue necesario considerar cuál es la técnica correcta de remo bajo techo y los 10 errores más comunes que en ella se cometan.

En el estado del arte, se presentaron 10 sistemas vigentes que capturan cinemática del esqueleto humano, algunos de ellos solo poseen desarrollo en hardware, otros en software y algunos una combinación de ambos; pero se verificó que no existe un prototipo que analice la cinemática de la técnica del remo bajo techo, lo que permitió desarrollar la presente propuesta.

De acuerdo con el objetivo del presente trabajo terminal, se logró sentar las bases para el análisis descriptivo y cuantitativo de la cinemática del remo bajo techo a favor de la técnica, presentando un modelo biónico; con la finalidad de extraer, procesar y desplegar información útil para el entrenador y el atleta; además se desarrolló una etapa de hardware que se encarga de la medición de las variables físicas de interés para su posterior análisis y procesamiento. Se cumplió con la etapa de comunicación inalámbrica de la adquisición de señales de los sensores iniciales.

Al algoritmo de Denavit-Hartenberg se le proporcionaron restricciones biológicas para adecuar el comportamiento cinemático del esqueleto del atleta, en específico en las articulaciones. Este algoritmo fue seleccionado por la estructura mecánica del esqueleto y las articulaciones que en conjunto son vistas como cadenas cinemáticas abiertas. La matriz de transformaciones de este algoritmo nos permitió acotar la región de los movimientos usados en remo bajo techo.

Las restricciones del sistema biológico del atleta relacionadas con las distancias de los segmentos corporales y los ángulos relativos a las articulaciones, se obtuvieron del método antropométrico de segmentación por altura, como se ve en la [Figura 6.3](#) y los ángulos de acciones permitidas fueron tomados de [Tabla 6.6](#), [Tabla 6.7](#), [Tabla 6.8](#) y [Tabla 6.9](#) para ser consideradas por el algoritmo de Denavit-Hartenberg y construir la envolvente correspondiente. Específicamente se reportó el movimiento general de la columna.

El mapa de movimientos generados por el algoritmo de Denavit-Hartenberg es descrito como el movimiento realizado por un robot. El robot solo analiza la cinemática o el movimiento biológico

dentro de un simulador como Matlab, este se puede aplicar en la corrección de la técnica de remo bajo techo.

Por otra parte dentro del remo bajo techo, el puño es el encargado de sujetar el mango de la remadora y un punto a corregir es el ángulo de flexión de la articulación de la muñeca para llevar la técnica a una condición correcta. Los entrenadores basan sus técnicas de corrección observando la posición correcta de cada extremidad y en específico comienzan con la muñeca. De Las pruebas realizadas en el club de remo, se capturó información cinemática de un atleta ejecutando la técnica con ayuda del sistema de instrumentación, considerando como parámetro de interés el ángulo de la muñeca izquierda.

La corrección de la posición en la muñeca por el método de Denavit-Hartenberg no es necesaria porque solo se cuenta con un eslabón con 3 movimientos, el cual se corrige verificando el ángulo en todo el ciclo de la remada con la instrumentación desarrollada.

Capítulo 9

Trabajos Futuros

El presente trabajo establece las bases de un estudio cinemático del esqueleto humano, considerando que el modelo biónico que se reporta solo considera las extremidades superiores y el tronco, el análisis se puede extender a las extremidades inferiores, así como el estudio en otras disciplinas deportivas.

En el desarrollo se reporta la construcción de un sistema de medición electrónico el cual puede ser multiplicado para capturar información simultánea en varios puntos del cuerpo humano considerando un sistema de tiempo real (RTOS) que gestione la información a medir, así como la inclusión de otras tecnologías como son los magnetómetros, brújulas electrónicas, sensores de flexión adheridos al cuerpo humano. La implementación de otros protocolos para la comunicación entre el sistema de medición y la computadora como el HID (*Human Interface Device* o dispositivo de interfaz humana) o el uso de protocolos web, expande las aplicaciones del proyecto realizado.

Se puede considerar que la carga de procesamiento la realice una FPGA o un DSP conectado a los sensores iniciales, haciendo uso de filtros adaptativos y/o lógica difusa embebida en el código, para que la computadora o un dispositivo móvil como los IPAD o teléfonos celulares solo realicen el despliegue de la información.

El diseño y desarrollo de una prenda vestible que albergue el sistema electrónico de medición, ya sea una malla, o la utilización de pegamento adherible a la piel del atleta análogo a los electrodos de propósito biomédico para la colocación de los sensores.

Por último, el uso de visión artificial y sistemas de posicionamiento global (GPS) complementan los estudios cinemáticos del presente trabajo.

Bibliografía

- [1] [http://es.wikipedia.org/wiki/Remo_\(deporte\)](http://es.wikipedia.org/wiki/Remo_(deporte)) Consultado: 25 / Diciembre / 2010
- [2] <http://www.worldrowing.com> Página de la FISA. Consultado: 9 / Enero / 2011
- [3] Dr. Valery Kleshnev, Rowing Biomechanics: Technology and Technique © 2004
- [4] <http://hrr.co.uk/> henley royal regatta
- [5] <http://www.vermontc2.com/competicionesintro.php> Consultado: 25/ Diciembre / 2010
- [6] <http://www.concept2.com/us/company/story/timeline.asp> linea del tiempo de concept2
- [7] <http://www.vermontc2.com/competicionesintro.php> Consultado: 23/ Diciembre / 2010
- [8] Federación. Mexicana de Remo, **Reglamento de competencias de remo en maquina**, 1era Edición; 22 de septiembre de 2007, México
- [9] <http://www.inedec.gob.mx/noticias.php?id=1230> Consultado: 2 / Enero / 2011
- [10] <http://www.concept2.com/sranking03/rankings.asp> Consultado: 25/ Diciembre / 2010
- [11] C. K. Atksion y T. O'Neili; **Remo Indoor Guía De Entrenamiento**: Sección 2 Pautas Para Entrenamiento; Editorial Concept2; 2008, San Sebastian, Cap. 3: 15,16, Cap. 4: 17-20
- [12] Rámon Zambudio Periago, **Protesis, Ortesis Y Ayudas Técnicas**, Ed. Elsevier Masson, Pag. 1, ISBN: 978-84-458-1969-2.
- [13] Lormes W, Buckwitz R, Rebbein H, Steinacker M.J, **Performace and blood lactate on gjesing and Concept2 rowing ergometers**, Int. J. Sports Med. 1993, 14: 29-32.

- [14] Bell G, Syrotuik DG, Attwood K, Quinney HA, **Maintenance of strength gains while performing endurance training in oarsmen**, J. Appl. Physiol. 1993, 18:104-115.
- [15] Yamamoto M, Kaneisa YH, **Dinamics of anaerobic and aerobic suplies during sustained high intensity exercise on cycle ergometer.”** Eur. J. Appl. Physiol. 1995 71: 320-325.
- [16] González J.M, Santisteban J.M, Ainz F. “**Valoración Funcional En Laboratorio Del Remero**”. Archivos de Medicina del Deporte. 1996, XIII: 99-105.
- [17] R.Davoodi, B.J.Andrew,G.D.Wheler, “**Manual And Automatic Control Of Fes-Assisted Indoor Rowing Exercice**” ,Paper Universidad de Alberta, Universidad de California y Hospital Stoke Mandeville, 2002.
- [18] Jeffrey Cornett , Pamela Bush , Nancy Cummings , “**An 8-Factor Model For Evaluating Crew Race Performance**”, International Journal of Sports Science and Engineering Vol. 02 (2008) No. 03, pp. 169-184, ISSN 1750-9823
- [19] Mayorga Vega, D. y Merino Marban, R. **Estudio cualitativo de los errores más frecuentes en los ejercicios de remo.** Revista Internacional de Medicina y Ciencias de la Actividad Física y el Deporte vol. 8 (30) pp.184-198
- [20] Ante Panjkota, Ivo Stančić, Tamara Šupuk, **A fuzzy qualitative framework for indoor rowing kinematics analysis**, Paper Universidad de split Ruđera Boškovića bb CROATIA, Issue 8, Volume 5, August 2009 , ISSN: 1790-5052
- [21] D.Cirmirakis 1, J.K. Pollard 2, **Rowing Optimisation**, IEEE International Workshop on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems, Paper School of Electrical Engineering and Computer Science, Queen Mary University of London, Department of Electronic & Electrical Engineering, University College London, WC1E 7JE, UK, 21-23 September 2009, Rende (Cosenza), Italy
- [22] <http://www.xsens.com> Página del Fabricante Xsens, Consultada: 5 / Enero / 2011
- [23] <http://www.animazoo.com/> Consultada: 8 / Enero / 2011
- [24] <http://www.ptiphoenix.com> Consultada: 8 / Enero / 2011
- [25] <http://www.biorow.com> Consultada: 8 / Enero / 2011
- [26] <http://www.ammssensor.com> Consultada: 8 / Enero / 2011
- [27] <http://www.cyberglovesystems.com/> Consultada: 8 / Enero / 2011
- [28] www.intersense.com InertiaCube BTConsultada: 8 / Enero / 2011
- [29] <http://us.playstation.com/ps3/playstation-move/> Play Statition Move Consultada: 8 / Enero / 2011

- [30] www.umanaingenieria.com/ Ingenieria Biomecánica Consultada: 8 / Enero / 2011
- [31] www.digitalrowing.com/ Consultada: 8 / Enero / 2011
- [32] http://es.wikipedia.org/wiki/GNU_General_Public_License Consultado: 6 Enero 2011
- [33] Patricia de la Peña Sobarzo, **Biomecánica Deportiva**, Articulo Revista El faro UNAM, Julio - Agosto de 2008, no. 88 – 89, Pág. 8 .
- [34] Izquierdo Redin, Mikael, **Biomecánica y bases neuromusculares de la actividad física y el deporte**, Ed. Médica Panamericana, Págs. 2-4,18-23,33,34, 48-50, ISBN 978-84-9835-023-4,
- [35] <http://www.iea.cc/> Asociación Internacional de Ergonomía Consultado: 17 / Febrero / 2011
- [36] <http://www.mail.com/sports/other/94120-paralympians-recovery-legs-regained-dreams-lost.html> Consultada: 8 / Enero / 2011
- [37] www.unalmed.edu.co/fisica/...1/.../capitulo_1_preliminares.pdf fecha de consulta: 31 de diciembre de 2010 hora: 12:03 pm escrito pdf publicado por la universidad de Colombia.
- [38] Margareta Nordin, Victor H. Frankel, **Biomécanica básica del sistema musculosquelético**, McGraw Hill, 3a Ed., Pág 4, 2004
- [39] W. R. Hamilton, **Elements of quaternions**. London, U.K.: Longman, 1866.
- [40] G. Martínez-Sierra et al, **Una epistemología histórica del producto vectorial: del cuaternion al análisis vectorial**, publicación científica: Centro de Investigación en Ciencia Aplicada y Tecnología Avanzada - Unidad Legaria CICATA , ISSN 1870-9095, 3 de Mayo de 2008
- [41] Mark W. Spong , **Robot dinamics and control**, editorial John While and Sons, Inc.,pagina 33-50, 1989 EU, ISBN: 0-471-61243-X
- [42] Richard L. Burden, J. Douglas Faires, **Análisis Numérico**, Ed. Iberoamericana,1985, Pág. 228,579
- [43] Dr. Valery Kleshnev ,**Desarrollo de la biomecánica del remo**,Volumen 1 No 4,Abril 2001
- [44] Kleshnev V. 2001. **Racing Strategy in Rowing during Sydney Olympics**. Australian Rowing. 24(1), 20-23.
- [45] Strome S. et al. 1977. **Assessment of maximal aerobic power in specifically trained athletes**. Journal of applied physiology. 42(6), 833-837.

- [46] Kleshnev V., 1998, **Estimation of Biomechanical Parameters and Propulsive Efficiency in Rowing**. Unpublished.
- [47] Izquierdo Redin, Mikael, **Biomecánica y bases neuromusculares de la actividad física y el deporte**, Editorial Medica Panamericana, pagina 1, ISBN 978-84-9835-023-4,
- [48] <http://www.digitalrowing.com/Products/Home/index.htm> fecha de consulta: 25/12/09 15:34
- [49] Matveev, Lev, **Fundamentos del Entrenamiento**, Raduga, Universidad de Antioquia; 2005
- [50] G. R. Suárez, **Técnica, Biomecánica Y Aprendizaje Motriz**, Universidad De Antioquia; 2006
- [51] Álvarez, A. (2003). **Estrategia, táctica y técnica: definiciones, características y ejemplos de los controvertidos términos**. Lecturas, Educación Física y Deportes. 9 (60).
- [52] J.S.Molinuevo, **Fundamentos de la técnica deportiva**, publicación impreso digital universidad politécnica pdf Capitulo 3:página3, 4
- [53] J. A. Fernández, J. C. Mateos, **Estudio biomecánico del ejercicio de remo: análisis biomecánico de la posición de ataque**, revista ciencia y deporte.net issn 1698-8388; pagina 7
- [54] National Instrument, **Acondicionamiento de señales**, PDF National Instrument: 4
- [55] Erick López Pérez, **Tutorial del Protocolo RS-232** “; Publicacion Impreso Ingenieria En Microcontroladores, Capitulo 1; 4-5
- [56] http://www.nxp.com/documents/user_manual/UM10204.pdf **I2C-bus specification and user manual**, Philips Semiconductor, 2007
- [57] Miguel Torres Torriti, **Tutorial Microcontroladores Pic**”; publicación de la universidad de Chile; 26 de abril del 2007; pagina 3,25
- [58] Hernández García Liliana Fernanda: “**Sistema de análisis durante la fase de entrenamiento de marcha olímpica**”: Tesis Upiita Bionica: 5: 35-36, 38-39 cambiar.
- [59] Claudio H. Taboadela, **Goniometría una herramienta para la evaluación de las incapacidades laborales**. 1^a Ed. Buenos Aires: Asociart ART, 2007. Pág. 19
- [60] Ken Shoemake, **Quaternions**, Department of Computer and Information Science University of Pennsylvania Philadelphia, PA 19104

- [61] Elkin Vesli et al , **Analisis cinemático de un exoesqueleto de partes superior con 7 grados de libertad** , Publicacion: Paper en PDF, Universidade Federal do Rio de Janeiro,Brasil, pagina 2,3,4 .
- [62] J. L. Pons, **Wearable Robots: Biomechatronic Exoeskeleton**, Jhon Whiley & Sons, Ltd, 2008.
- [63] E. Rocon, J. L. Pons, **Case study: study of tremor characteristics based on a biomechanical model of the upper limb**. In: J. L. Pons., Wearable Robots: Biomechatronic Exoeskeleton, Jhons Willey & Sons, Ltd, 2005, pp: 80-85.
- [64] B. Gowitzke, M. Milner, **Scientific Bases of Human Movements**, Ed. Paidotribo, 2000.
- [65] X. Wang, J. P. Verriest, **A geometric algorithm to predict the arm reach posture for computer-aided ergonomic evaluation**, The Journal of Visualizaiton and Posture Animation,1998, pp. 33-47.
- [66] E. R. Bachmann, **Orientation tracking for humans and robots using inertial sensors**, Naval Postgraduate School, Monterey, CA 93943E-mail: bachmann@cs.nps.navy.mil ,Accepted by the 1999 International Symposium on Computational Intelligence in Robotics & Automation (CIRA99), paginas 1-8.
- [67] Raphaël Townshend, **FutureHand: the use of an inertial measurement unit as a USB device**, Pág. 73, 2010
- [68] Tomoaki Tusuki, **ADXL345 Quick Start Guide**, Application Note, Analog Devices, 2010.
- [69] ADXL345 Hoja de especificaciones, <http://www.sparkfun.com/datasheets/Sensors/Accelerometer/ADXL345.pdf>
- [70] <http://es.wikipedia.org/wiki/Blender> Consultado: 9 / Enero / 2011
- [71] <http://www.atmel.com/products/avr/> Consultado: 9 / Enero / 2011
- [72] www.vc.ehu.es/ingme/vec.pdf Escuela Universitaria de Ingeniería Vitoria-Gasteiz.
- [73] <http://wiki.blender.org/index.php/Doc:ES/Manual/Introduction> Consultado: 9 / Enero / 2011
- [74] <http://www.cadsoftusa.com/info.htm> Consultado: 9 / Enero / 2011
- [75] Prof. Dr. Eduardo Escobar , **Introducción a Olpc, Sugar y Python**, Trabajo Práctico de Seminario III , Universidad Nacional de La Rioja, 2010
- [76] <http://www.lyx.org/WebEs.Home> Consultado: 9 / Enero / 2011
- [77] <http://www.mathworks.com/products/matlab/> Consultado: 9 / Enero / 2011

- [78] <http://www.mikroe.com/eng/products/view/228/mikroc-pro-for-avr/> Consultado: 9 / Enero / 2011
- [79] http://www.panda3d.org/manual/index.php/Introduction_to_Panda3D Consultado: 9 / Enero / 2011
- [80] [http://es.wikipedia.org/wiki/Bater%C3%ADa_\(electricidad\)](http://es.wikipedia.org/wiki/Bater%C3%ADa_(electricidad)) Consultado: 7 / Enero / 2011
- [81] Datasheet, MAX1555, Maxim Integrated Products, Pág. 6, Jul, 2003
- [82] <http://www.sparkfun.com/products/9156> Triple Axis Accelerometer Breakout - ADXL345 Consultado: 9 / Enero / 2011
- [83] <http://www.sparkfun.com/products/9801> Triple-Axis Digital-Output Gyro ITG-3200 Breakout Consultado: 9 / Enero / 2011
- [84] <http://www.sparkfun.com/products/582> Bluetooth Modem - BlueSMiRF Gold Consultado: 9 / Enero / 2011
- [85] <http://www.bluetooth.com/Pages/About-Us.aspx> Consultado: 9 / Febrero / 2011
- [86] Douglas Comer, **Internetworking With TCP/IP Volume 1: Principles Protocols, and Architecture**, 5th Ed, 2006, Pág. 155, Prentice Hall, ISBN 0-13-187671-6.
- [87] <http://www.etsi.org> Consultado: 9 / Febrero / 2011
- [88] Andre Vleeming, Vert Mooney, Rob Stoeckart, **Movimiento, estabilidad y dolor lumbopelvico (integración de la investigación con el tratamiento)**, Ed: Elsevier Masson, Elsevier España, 2008, Pág. 162, ISBN 978-0-443-10178-6
- [89] J. Alberto Cruz G., G. Andrés Garnica G, **Ergonomía aplicada**, 3^a Ed., Ed. Ecoe Ediciones, Cataluña España, Pág. 32
- [90] American Academy of orhtopeadic Surgeons, **Medición clínica del movimiento articular**, Ed. Grupo Mind México, Págs. 17,28,70
- [91] <http://www.sparkfun.com/datasheets/Sensors/Gyro/ITG-3200-v10.pdf> Consultado: 9 / Enero / 2011
- [92] <http://www.sparkfun.com/datasheets/RF/BlueSMiRF-Gold-ChipAnt-v1.pdf> Consultado: 9 / Enero / 2011
- [93] Albert D. Helfrick, William D. Cooper, **Instrumentación electrónica moderna y técnicas de medición**, Ed. Prenctice Hall, 1991, Pág. 10
- [94] <http://www.analog.com/en/mems/low-g-accelerometers/adxl345/products/product.html> Consultado: 9 / Enero / 2011
- [95] www.comunidadatmel.com David Infante, Instituto Tecnológico de Morelia. Consultado: 9 / Enero / 2011

%APENDICE A

%programa que genera las graficas capturadas al atleta en el remoergómetro

%estas instrucciones limpian la memoria y cierra figuras abiertas

clc, clear all, close all;

%Se carga el registro de las señales medidas almacenarse en la variable Data

Data = load('record1.txt');

del taT=0.0043; %tiempo de muestreo medido con el osciloscopio

t = ((0:length(Data))-1)*del taT'; %vector tiempo normalizado al tiempo de muestreo

%-----Separacion de las señales en vectores-----

sensibilidad=14.375; %dato facilitado por el fabricante

Wx = Data(:, 1)/sensibilidad;

Wy = Data(:, 2)/sensibilidad;

Wz = Data(:, 3)/sensibilidad;

%-----

xmin=0; %dimensiones de la gráfica

xmax=5;

ymin=-10;

ymax=10;

%-----tratamiento de Wx-----

[p1, S1, mu1] = polyfit(t, Wx, 3); %interpolacion de 3er orden

f1 = polyval(p1, t, S1, mu1);

Nx=Wx-f1; %resta del polinomio interpolador

plot(t, Nx);

title('Componente Wx', 'FontSize', 13);

xlabel('Tiempo [s]', 'FontSize', 15);

ylabel('Velocidad angular [deg/s]', 'FontSize', 15);

set(gca, 'XTick', xmin:xmax/20:xmax, 'FontSize', 15);

set(gca, 'YTick', ymin:ymax/10:ymax, 'FontSize', 15);

axis([xmin xmax ymin ymax]);

grid on;

%-----tratamiento de Wy-----

[p2, S2, mu2] = polyfit(t, Wy, 4);

f2 = polyval(p2, t, S2, mu2);

Ny=Wy-f2;

figure

plot(t, Ny);

title('Componente Wy', 'FontSize', 13);

xlabel('Tiempo [s]', 'FontSize', 15);

ylabel('Velocidad angular [deg/s]', 'FontSize', 15);

set(gca, 'XTick', xmin:xmax/20:xmax, 'FontSize', 15);

set(gca, 'YTick', ymin:ymax/10:ymax, 'FontSize', 15);

axis([xmin xmax ymin ymax]);

grid on;

%-----tratamiento de Wz-----

```
[p3, S3, mu3] = polyfit(t, Wz, 4);
f3 = polyval(p3, t, S3, mu3);
Nz=Wz-f3;
figure
plot(t, Nz);
title('Componente Wz', 'FontSize', 13);
xlabel('Tiempo [s]', 'FontSize', 15);
ylabel('Velocidad angular [deg/s]', 'FontSize', 15);
set(gca, 'XTick', xmin:xmax/20:xmax, 'FontSize', 15);
set(gca, 'YTick', ymin:ymax/10:ymax, 'FontSize', 15);
axis([xmin xmax ymin ymax]);
grid on;
```

% %-----

```
datos = [Wx, Wy, Wz, f1, f2, f3];
figure
plot(t, Wx, '+', t, Wy, '*', t, Wz);
legend('Wx', 'Wy', 'Wz');
title('Gráfico de velocidad angular vs tiempo', 'FontSize', 15);
xlabel('Tiempo [s]', 'FontSize', 15);
ylabel('Velocidad angular [deg/s]', 'FontSize', 15);
set(gca, 'XTick', xmin:xmax/20:xmax, 'FontSize', 15);
set(gca, 'YTick', ymin:ymax/10:ymax, 'FontSize', 15);
axis([xmin xmax ymin ymax]);
grid on;
```

```

##APENDICE C CÓDIGO PYTHON DE LECTURA DEL PUERTO SERIAL

----- importar modulos incluyendo al actor -----


from direct.showbase import DirectObject
from pandac.PandaModules import *
from direct.task.Task import Task
from direct.actor import Actor

import sys
import Gnuplot, Gnuplot.funcutils
import time
import serial
import os

if __name__ == '__main__':
    import direct.directbase.DirectStart

----- definición de todos los métodos en la clase principal -----


class seri_class(DirectObject.DirectObject):
    def __init__(self):
        #----- tecla ESC termina al ejecución del programa -----
        self.accept('escape', sys.exit)
        self.nodoBase=render.attachNewNode('legraf nodoBase')
        self.config()
        self.petición()
        self.lectura()
        self.ar= open('tt.txt', 'w')
        self.ar.writelines('0 0 0 0 0 0\n')
        self.ar.close()
        self.graf=Gnuplot.Gnuplot(debug=0)
        self.graf.title('Datos IMUs')
        self.graf.plot(
            ## Gnuplot.File('tt.txt', usin=1, width_=linespoints',
            title = 'Ax'),           ## Gnuplot.File('tt.txt', usin=2, width_=linespoints',
            title = 'Ay'),           ## Gnuplot.File('tt.txt', usin=3, width_=linespoints',
            title = 'Az'),           ## Gnuplot.File('tt.txt', usin=4, width_=linespoints', title =
            'Wx'),                  ## Gnuplot.File('tt.txt', usin=5, width_=linespoints', title =
            'Wy'),                  ## Gnuplot.File('tt.txt', usin=6, width_=linespoints', title =
            'Wz')
        )
        taskMgr.add(self.update, "Update comm")

----- configuración de puerto serial -----


def config(self):
    self.ser = serial.Serial(4)
    self.ser.baudrate =115200
    self.ser.open()

def petición(self):
    self.ser.write("@")

def lectura(self):
    self.p = self.ser.read(42)
    self.datos = []
    for algo in self.p.split():

```

```

sel f. datos. append(int(al go))

----- creacion de la base de datos tt.txt ----

def graficacion(sel f):
    sel f. ar= open('tt.txt', 'a')
    sel f. ar. writelines(
        str(sel f. datos[0])+' '+' '
        str(sel f. datos[1])+' '+' '
        str(sel f. datos[2])+' '+' '
        str(sel f. datos[3])+' '+' '
        str(sel f. datos[4])+' '+' '
        str(sel f. datos[5])+'\n'
    )
    sel f. ar. close()

----- administrador de tareas ----

def update(sel f, task):
    if time.clock() > 60:
        sel f. ser. close()
        sys.exit()
    sel f. peticion()
    sel f. lectura()
    sel f. graficacion()
    messenger.send("Datos Serial", [sel f. datos])
    return Task.cont

comm_blue = seri_class()

if __name__ == '__main__':
    run()

```

```

##APENDICE D MODELO 3D DEL AVATAR DE REMO

import direct.directbase.DirectStart
from pandac.PandaModules import*
from direct.task import Task
from direct.actor import Actor

#actor importa el avatar3d
#Task me permite manejar tareas

from direct.interval.IntervalGlobal import*
from direct.showbase import DirectObject
from serial_bluetooth import *
from direct.gui.OnscreenText import OnscreenText
from math import *

## base.ooobe()
class HumanClass(DirectObject.DirectObject):
    def __init__(self):
        self.archivo = open('record.txt', 'w')

        #importacion del avatar *.egg al motor de juegos.
        self.human = Actor.Actor('hombre_base2')
        self.human.reparentTo(render)
        base.camera.reparentTo(self.human)
        base.camera.setY(-16)
        base.camera.setZ(3)
        base.disableMouse()

        self.accept("q", self.cambiarFun, [1])
        self.accept("a", self.cambiarFun, [-1])
        self.accept("z", self.reset)

        self.accept("w", self.selectPart, [0])
        self.accept("e", self.selectPart, [1])
        self.accept("r", self.selectPart, [2])
        self.accept("s", self.selectPart, [4])
        self.accept("d", self.selectPart, [5])
        self.accept("f", self.selectPart, [6])
        self.accept("x", self.selectPart, [8])
        self.accept("c", self.selectPart, [9])
        self.accept("v", self.selectPart, [10])

        self.createProxy()

        #asignacion del avatar al nodo principal del motor grafico
        self.human.reparentTo(render)

        #seccion de control de articulacion del avatar
        self.Pelvis = self.human.controlJoint(None, "model Root", "Pelvis")
        self.Hip_L = self.human.controlJoint(None, "model Root", "Hip_L")
        self.UpperLeg_L = self.human.controlJoint(None, "model Root", "UpperLeg_L")
        self.LowerLeg_L = self.human.controlJoint(None, "model Root", "LowerLeg_L")
        self.Foot_L = self.human.controlJoint(None, "model Root", "Foot_L")
        self.Hip_R = self.human.controlJoint(None, "model Root", "Hip_R")
        self.UpperLeg_R = self.human.controlJoint(None, "model Root", "UpperLeg_R")


```

```

sel f. LowerLeg_R      =
sel f. human. control Joint(None, "model Root", "LowerLeg_R")
    sel f. Foot_R      = sel f. human. control Joint(None, "model Root", "Foot_R")

    sel f. Back         = sel f. human. control Joint(None, "model Root", "Back")
    sel f. Neck         = sel f. human. control Joint(None, "model Root", "Neck")
    sel f. Head         = sel f. human. control Joint(None, "model Root", "Head")

    sel f. Shoulder_L   =
sel f. human. control Joint(None, "model Root", "Shoulder_L")
    sel f. UpperArm_L   =
sel f. human. control Joint(None, "model Root", "UpperArm_L")
    sel f. LowerArm_L   =
sel f. human. control Joint(None, "model Root", "LowerArm_L")
    sel f. Palm_L        = sel f. human. control Joint(None, "model Root", "Palm_L")
    sel f. Fingers_L    =
sel f. human. control Joint(None, "model Root", "Fingers_L")
    sel f. Thumb_L       = sel f. human. control Joint(None, "model Root", "Thumb_L")
    sel f. Shoulder_R   =
sel f. human. control Joint(None, "model Root", "Shoulder_R")
    sel f. UpperArm_R   =
sel f. human. control Joint(None, "model Root", "UpperArm_R")
    sel f. LowerArm_R   =
sel f. human. control Joint(None, "model Root", "LowerArm_R")
    sel f. Palm_R        = sel f. human. control Joint(None, "model Root", "Palm_R")
    sel f. Fingers_R    =
sel f. human. control Joint(None, "model Root", "Fingers_R")
    sel f. Thumb_R       = sel f. human. control Joint(None, "model Root", "Thumb_R")

```

```

sel f. lista = []
sel f. parteEscogida = 0

sel f. lista.append(sel f. Palm_R)
sel f. lista.append(sel f. LowerArm_R)
sel f. lista.append(sel f. UpperArm_R)
sel f. lista.append(sel f. Shoulder_R)

sel f. lista.append(sel f. Palm_L)
sel f. lista.append(sel f. LowerArm_L)
sel f. lista.append(sel f. UpperArm_L)
sel f. lista.append(sel f. Shoulder_L)

sel f. lista.append(sel f. Head)
sel f. lista.append(sel f. Neck)
sel f. lista.append(sel f. Back)

sel f. lista.append(sel f. Fingers_R)
sel f. lista.append(sel f. Fingers_L)
sel f. lista.append(sel f. Thumb_R)
sel f. lista.append(sel f. Thumb_L)

sel f. lista.append(sel f. Pelvis)
sel f. lista.append(sel f. Hip_L)
sel f. lista.append(sel f. Foot_L)
sel f. lista.append(sel f. Hip_R)
sel f. lista.append(sel f. Foot_R)

```

```

sel f. datos = []
sel f. accept("Datos Serial", sel f. actualizaDatos)

```

```

sel f. Wx = 0

```

```

sel f. Wy = 0
sel f. Wz = 0

taskMgr.add(sel f. update, "Update human")

def creaProxy(sel f):
    sel f. esfera = loader.loadModel('esfera')
    sel f. esfera.reparentTo(render)
    sel f. esfera.setTransparency(True)
    sel f. esfera.setTransparency(TransparencyAttrib.MAlpha)
    sel f. esfera.setScale(0.3)

    sel f. listaExposeJoints = []

sel f. listaExposeJoints.append(sel f. human.exposeJoint(None, "model Root", "Palm_R"))
sel f. listaExposeJoints.append(sel f. human.exposeJoint(None, "model Root", "LowerArm_R"))

sel f. listaExposeJoints.append(sel f. human.exposeJoint(None, "model Root", "UpperArm_R"))

sel f. listaExposeJoints.append(sel f. human.exposeJoint(None, "model Root", "Shoulder_R"))

sel f. listaExposeJoints.append(sel f. human.exposeJoint(None, "model Root", "Palm_L"))
sel f. listaExposeJoints.append(sel f. human.exposeJoint(None, "model Root", "LowerArm_L"))

sel f. listaExposeJoints.append(sel f. human.exposeJoint(None, "model Root", "UpperArm_L"))

sel f. listaExposeJoints.append(sel f. human.exposeJoint(None, "model Root", "Shoulder_L"))

sel f. listaExposeJoints.append(sel f. human.exposeJoint(None, "model Root", "Head"))

sel f. listaExposeJoints.append(sel f. human.exposeJoint(None, "model Root", "Neck"))

sel f. listaExposeJoints.append(sel f. human.exposeJoint(None, "model Root", "Back"))

sel f. listaExposeJoints.append(sel f. human.exposeJoint(None, "model Root", "Fingers_R"))

sel f. listaExposeJoints.append(sel f. human.exposeJoint(None, "model Root", "Fingers_L"))

sel f. listaExposeJoints.append(sel f. human.exposeJoint(None, "model Root", "Thumb_R"))

sel f. listaExposeJoints.append(sel f. human.exposeJoint(None, "model Root", "Thumb_L"))

sel f. listaExposeJoints.append(sel f. human.exposeJoint(None, "model Root", "Pelts"))

sel f. listaExposeJoints.append(sel f. human.exposeJoint(None, "model Root", "Hip_L"))

sel f. listaExposeJoints.append(sel f. human.exposeJoint(None, "model Root", "Foot_L"))

sel f. listaExposeJoints.append(sel f. human.exposeJoint(None, "model Root", "Hip_R"))

sel f. listaExposeJoints.append(sel f. human.exposeJoint(None, "model Root", "Foot_R"))

def actualizaDatos(sel f, dat):
    textObject = OnscreenText(text = 'my text string', pos = (-0.5, 0.02),
    scale = 0.07)

```

```

sel f. datos = dat;

def cambi aFun(sel f, num):
    sel f. parteEscogi da += num
    sel f. parteEscogi da = sel f. parteEscogi da%len(sel f. lista)

def selectPart(sel f, num):
    sel f. parteEscogi da = num

def filtro(sel f):
    sel f. Wx = sel f. datos[3] - 13.5
    if sel f. Wx > 5 and sel f. Wx < -5:
        sel f. Wx = 0

    sel f. Wy = sel f. datos[4] + 13
    if sel f. Wy > 5 and sel f. Wy < -5:
        sel f. Wy = 0

    sel f. Wz = sel f. datos[5] - 15
    if sel f. Wz > 5 and sel f. Wz < -5:
        sel f. Wz = 0

## print sel f. Wx, sel f. Wy, sel f. Wz

sel f. Wx *= 0.0036
sel f. Wy *= 0.0036
sel f. Wz *= 0.0036

def reset(sel f):
    sel f. lista[sel f. parteEscogi da]. setHpr(0, 0, 0)

def update(sel f, task):
    sel f. filtro()
    sel f. lista[sel f. parteEscogi da]. setH( sel f. lista[sel f. parteEscogi da]. getH()
+ sel f. Wx)
    sel f. lista[sel f. parteEscogi da]. setP( sel f. lista[sel f. parteEscogi da]. getP()
+ sel f. Wz)
    sel f. lista[sel f. parteEscogi da]. setR( sel f. lista[sel f. parteEscogi da]. getR()
- sel f. Wy)

    sel f. esfera. setPos(sel f. listaExposeJoints[sel f. parteEscogi da]. getPos())
    sel f. esfera. setH(sel f. esfera. getH() + 20)

    frec = 1
    sel f. esfera. setScale(0.2+0.1*sin(task. time*frec*2*3.14))

    sel f. archivo. write(str(sel f. lista[sel f. parteEscogi da]. getH())+' '+
str(sel f. lista[sel f. parteEscogi da]. getP())+' '+
str(sel f. lista[sel f. parteEscogi da]. getR())+'\n')

print sel f. lista[sel f. parteEscogi da]. getHpr()

return Task. cont

human = human_class()

## base. oobe()
run()

```

```

#APENDICE E programa modelo 3D del avatar deportista.

import direct.directbase.DirectStart
from pandac.PandaModules import*
from direct.task import Task
from direct.actor import Actor

#actor importa el avatar3d
#Task me permite manejar tareas

from direct.interval.IntervalGlobal import*
from direct.showbase.DirectObject import

from math import *

class HumanClass(DirectObject.DirectObject):
    def __init__(self):
        self.f.file = open('record1.txt', 'r')
        self.f fileList = self.f.file.readlines()
        self.f.totalLines = len(self.f.fileList)
        self.f.file.close()

        self.f.postTempo = 0

        #importacion del avatar *, egg al motor de juegos.
        self.f.human = Actor.Actor('hombre_base2')
        self.f.human.reparentTo(render)
        base.camera.reparentTo(self.f.human)
        base.camera.setY(-16)
        base.camera.setZ(3)
        base.disableMouse()

        self.f.accept("q", self.f.cambiarFun, [1])
        self.f.accept("a", self.f.cambiarFun, [-1])

        self.f.accept("w", self.f.selectPart, [0])
        self.f.accept("e", self.f.selectPart, [1])
        self.f.accept("r", self.f.selectPart, [2])
        self.f.accept("s", self.f.selectPart, [4])
        self.f.accept("d", self.f.selectPart, [5])
        self.f.accept("f", self.f.selectPart, [6])
        self.f.accept("x", self.f.selectPart, [8])
        self.f.accept("c", self.f.selectPart, [9])
        self.f.accept("v", self.f.selectPart, [10])

        self.f.createProxy()

        #asignacion del avatar al nodo principal del motor grafico
        self.f.human.reparentTo(render)

        #seccion de control de articulacion del avatar
        self.f.Pelvis = self.f.human.controlJoint(None, "model Root", "Pelvis")
        self.f.Hip_L = self.f.human.controlJoint(None, "model Root", "Hip_L")
        self.f.UpperLeg_L =
        sel f.human.controlJoint(None, "model Root", "UpperLeg_L")
        self.f.LowerLeg_L =
        sel f.human.controlJoint(None, "model Root", "LowerLeg_L")
        self.f.Foot_L = self.f.human.controlJoint(None, "model Root", "Foot_L")
        self.f.Hip_R = self.f.human.controlJoint(None, "model Root", "Hip_R")
        self.f.UpperLeg_R =

```

```

sel f. human. control Joint(None, "model Root", "UpperLeg_R")
    sel f. LowerLeg_R      =
sel f. human. control Joint(None, "model Root", "LowerLeg_R")
    sel f. Foot_R          = sel f. human. control Joint(None, "model Root", "Foot_R")

    sel f. Back            = sel f. human. control Joint(None, "model Root", "Back")
    sel f. Neck            = sel f. human. control Joint(None, "model Root", "Neck")
    sel f. Head            = sel f. human. control Joint(None, "model Root", "Head")

    sel f. Shoulder_L     =
sel f. human. control Joint(None, "model Root", "Shoulder_L")
    sel f. UpperArm_L     =
sel f. human. control Joint(None, "model Root", "UpperArm_L")
    sel f. LowerArm_L     =
sel f. human. control Joint(None, "model Root", "LowerArm_L")
    sel f. Palm_L          = sel f. human. control Joint(None, "model Root", "Palm_L")
    sel f. Fingers_L       =
sel f. human. control Joint(None, "model Root", "Fingers_L")
    sel f. Thumb_L         = sel f. human. control Joint(None, "model Root", "Thumb_L")
    sel f. Shoulder_R      =
sel f. human. control Joint(None, "model Root", "Shoulder_R")
    sel f. UpperArm_R     =
sel f. human. control Joint(None, "model Root", "UpperArm_R")
    sel f. LowerArm_R     =
sel f. human. control Joint(None, "model Root", "LowerArm_R")
    sel f. Palm_R          = sel f. human. control Joint(None, "model Root", "Palm_R")
    sel f. Fingers_R       =
sel f. human. control Joint(None, "model Root", "Fingers_R")
    sel f. Thumb_R         = sel f. human. control Joint(None, "model Root", "Thumb_R")

    sel f. lista = []

    sel f. parteEscogida = 0
    sel f. tiempoReplay = 0.043
    sel f. tiempolnc = 1
    sel f. lastSenti do = 1

    sel f. lista.append(sel f. Palm_R)
    sel f. lista.append(sel f. LowerArm_R)
    sel f. lista.append(sel f. UpperArm_R)
    sel f. lista.append(sel f. Shoulder_R)

    sel f. lista.append(sel f. Palm_L)
    sel f. lista.append(sel f. LowerArm_L)
    sel f. lista.append(sel f. UpperArm_L)
    sel f. lista.append(sel f. Shoulder_L)

    sel f. lista.append(sel f. Head)
    sel f. lista.append(sel f. Neck)
    sel f. lista.append(sel f. Back)

    sel f. lista.append(sel f. Fingers_R)
    sel f. lista.append(sel f. Fingers_L)
    sel f. lista.append(sel f. Thumb_R)
    sel f. lista.append(sel f. Thumb_L)

    sel f. lista.append(sel f. Pelvis)
    sel f. lista.append(sel f. Hip_L)
    sel f. lista.append(sel f. Foot_L)
    sel f. lista.append(sel f. Hip_R)
    sel f. lista.append(sel f. Foot_R)

    sel f. accept('arrow_up', sel f. cambiaTiempoReplay, [-0.01])
    sel f. accept('arrow_down', sel f. cambiaTiempoReplay, [0.01])

```

```

sel f. accept('arrow_left', sel f. cambi aSenti do, [-1])
sel f. accept('arrow_right', sel f. cambi aSenti do, [1])
sel f. accept('space', sel f. pausa)

taskMgr.add(sel f. update, "Update human")

def pausa(sel f):
    if sel f. ti empol nc != 0:
        sel f. lastSenti do = sel f. ti empol nc
        sel f. ti empol nc = 0
    else:
        sel f. ti empol nc = sel f. lastSenti do

def cambi aSenti do(sel f, num):
    sel f. ti empol nc = num

def cambi aTi empoRepl ay(sel f, i nc):
    sel f. ti empoRepl ay += i nc

    if sel f. ti empoRepl ay <= 0:
        sel f. ti empoRepl ay = 0.01

def creaProxy(sel f):
    sel f. esfera = loader.loadModel('esfera')
    sel f. esfera.reparentTo(render)
    sel f. esfera.setTransparency(True)
    sel f. esfera.setTransparency(TransparencyAttrib.MAlpha)
    sel f. esfera.setScale(0.3)

    sel f. listaExposeJoints = []

sel f. listaExposeJoints.append(sel f. human.exposeJoint(None, "model Root", "Palm_R"))
sel f. listaExposeJoints.append(sel f. human.exposeJoint(None, "model Root", "LowerArm_R"))
sel f. listaExposeJoints.append(sel f. human.exposeJoint(None, "model Root", "UpperArm_R"))
sel f. listaExposeJoints.append(sel f. human.exposeJoint(None, "model Root", "Shoulder_R"))
sel f. listaExposeJoints.append(sel f. human.exposeJoint(None, "model Root", "Palm_L"))
sel f. listaExposeJoints.append(sel f. human.exposeJoint(None, "model Root", "LowerArm_L"))
sel f. listaExposeJoints.append(sel f. human.exposeJoint(None, "model Root", "UpperArm_L"))
sel f. listaExposeJoints.append(sel f. human.exposeJoint(None, "model Root", "Shoulder_L"))
sel f. listaExposeJoints.append(sel f. human.exposeJoint(None, "model Root", "Head"))
sel f. listaExposeJoints.append(sel f. human.exposeJoint(None, "model Root", "Neck"))
sel f. listaExposeJoints.append(sel f. human.exposeJoint(None, "model Root", "Back"))
sel f. listaExposeJoints.append(sel f. human.exposeJoint(None, "model Root", "Fingers_R"))
sel f. listaExposeJoints.append(sel f. human.exposeJoint(None, "model Root", "Fingers_L"))

```

```

sel f. listaExposeJoints. append(sel f. human. exposeJoint(None, "model Root", "Thumb_R"))
sel f. listaExposeJoints. append(sel f. human. exposeJoint(None, "model Root", "Thumb_L"))
sel f. listaExposeJoints. append(sel f. human. exposeJoint(None, "model Root", "Pelvis"))
sel f. listaExposeJoints. append(sel f. human. exposeJoint(None, "model Root", "Hip_L"))
sel f. listaExposeJoints. append(sel f. human. exposeJoint(None, "model Root", "Foot_L"))
sel f. listaExposeJoints. append(sel f. human. exposeJoint(None, "model Root", "Hip_R"))
sel f. listaExposeJoints. append(sel f. human. exposeJoint(None, "model Root", "Foot_R"))

def cambiAFun(sel f, num):
    sel f. parteEscogida += num
    sel f. parteEscogida = sel f. parteEscogida%len(sel f. lista)

def selectPart(sel f, num):
    sel f. parteEscogida = num

def update(sel f, task):
    sel f. postTempo += sel f. tempoLocal
    sel f. postTempo = sel f. postTempo%sel f. totalFrames
    print sel f. postTempo

sel f. lista[sel f. parteEscogida]. setHpr(float(sel f. fileList[sel f. postTempo]. split()[0]),
                                             float(sel f. fileList[sel f. postTempo]. split()[1]),
                                             float(sel f. fileList[sel f. postTempo]. split()[2]))
    sel f. esfera. setPos(sel f. listaExposeJoints[sel f. parteEscogida]. getPos())
    sel f. esfera. setH(sel f. esfera. getH() + 20)
    frec = 1
    sel f. esfera. setScale(0.2+0.1*sin(task. time*frec*2*3.14))
    print sel f. lista[sel f. parteEscogida]. getHpr()
taskMgr.doMethodLater(sel f. tempoReplay, sel f. update, 'update')
return Task.done

human = human_class()
run()

```

CRONOGRAMA DE TRABAJO TERMINAL 2

	Nombre de tarea		Duración	Comienzo	Fin
10%	MODELO BIÓNICO DEL SISTEMA	1/10	30 días	lun 31/05/10	vie 09/07/10
	Análisis morfológico	1/50	5 días	lun 31/05/10	vie 04/06/10
	Modelo conceptual	1/50	5 días	lun 07/06/10	vie 11/06/10
	Modelo matemático	1/50	10 días	lun 14/06/10	vie 25/06/10
	Aplicar el análisis morfológico al modelo matemático	1/50	5 días	lun 28/06/10	vie 02/07/10
	Deducción del modelo biomecánico	1/50	5 días	lun 05/07/10	vie 09/07/10
40%	DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE LA UNIDAD BÁSICA DE MEDICIÓN	2/5	50 días	lun 02/08/10	vie 08/10/10
	Estudio y pruebas con un IMU de 5 DOF	1/50	1 día	lun 02/08/10	lun 02/08/10
	Armar el circuito mínimo para el funcionamiento del Imu en protoboard	1/50	1 día	lun 02/08/10	lun 02/08/10
	Medición y visualización del comportamiento en un osciloscopio digital	1/50	1 día	lun 02/08/10	lun 02/08/10
	Reportar los resultados con su correspondiente interpretación	1/50	1 día	lun 02/08/10	lun 02/08/10
	Diseño de circuito utilizando PIC16F877A para la prueba del Imu de 5 DOF	1/50	5 días	mar 03/08/10	lun 09/08/10
	Prueba en protoboard del diseño del PIC16F877A	1/50	1 día	mar 10/08/10	mar 10/08/10
	Programación de algoritmo para ADC y comunicación serial en el Pic	1/50	1 día	mar 10/08/10	mar 10/08/10
	Reutilización del código del Electrogoniómetro para obtener gráficas de resultados	1/50	1 día	mar 10/08/10	mar 10/08/10
	Evaluación cambio de microcontrolador PIC por AVR	1/50	1 día	mar 10/08/10	mar 10/08/10
	Cotización y compra de Imu con 6DOF en México para pruebas con 2 IMUS	1/50	10 días	mié 11/08/10	mar 24/08/10
	Cotización y pedidos de acelerómetros a Estados Unidos	1/50	10 días	mié 11/08/10	mar 24/08/10
	Cotización y pedidos de giroscopos a Estados Unidos	1/50	10 días	mié 11/08/10	mar 24/08/10
	Capacitación Básica en MIKROC AVR	1/50	5 días	mié 25/08/10	mar 31/08/10
	Capacitación en el manejo del Programador Avr	1/50	2 días	mié 01/09/10	jue 02/09/10
	Estudio del protocolo de comunicación I2C	1/50	5 días	vie 03/09/10	jue 09/09/10
	Desarrollo de algoritmos para el microcontrolador utilizando el protocolo I2C	1/50	4 días	vie 10/09/10	mié 15/09/10
	Cotización y compra del módulo para comunicación inalámbrica (modem Bluetooth)	1/50	2 días	jue 16/09/10	vie 17/09/10
	Diseño general de la unidad de medición	1/50	5 días	lun 20/09/10	vie 24/09/10
	Construcción de la unidad de medición	1/50	5 días	lun 27/09/10	vie 01/10/10
	Montaje de la unidad de medición sobre el atleta	1/50	5 días	lun 04/10/10	vie 08/10/10

5%	COMUNICACIÓN DE LA UNIDAD BÁSICA CON LA UNIDAD DE PROCESAMIENTO Y LA INTERFAZ GRÁFICA	1/25	5 días	lun 11/10/10	vie 15/10/10
	Aprender a utilizar el módulo Bluetooth	1/50	2 días	lun 11/10/10	mar 12/10/10
	Construir el circuito mínimo para realizar la comunicación inalámbrica emisión-recepción	1/50	3 días	mié 13/10/10	vie 15/10/10
20%	PROCESAMIENTO POR COMPUTADORA	1/5	15 días	lun 27/09/10	vie 15/10/10
	Aprendizaje del motor gráfico Panda 3D y su lenguaje script python	1/50	5 días	lun 27/09/10	vie 01/10/10
	Instalación de Panda 3D	1/50	5 días	lun 27/09/10	vie 01/10/10
	Configuración e instalación de los módulos en Panda 3d	1/50	5 días	lun 27/09/10	vie 01/10/10
	Instalación del módulo Pyserial	1/50	2 días	lun 04/10/10	mar 05/10/10
	Aprendizaje del modelo Pyserial	1/50	3 días	lun 04/10/10	mié 06/10/10
	Elaboración del script para lectura y almacenamiento del puerto virtual serial	1/50	2 días	jue 07/10/10	vie 08/10/10
	Aprendizaje del integrador método Runge Kutta 4 orden	1/50	3 días	lun 11/10/10	mié 13/10/10
	Desarrollo del script Runge Kutta 4 orden	1/50	2 días	mar 05/10/10	mié 06/10/10
	Aprendizaje de filtros de Kalman	1/50	3 días	jue 07/10/10	lun 11/10/10
	Desarrollo de Filtros de Kalman	1/50	4 días	mar 12/10/10	vie 15/10/10
14%	CREACIÓN DEL AMBIENTE VIRTUAL	7/50	15 días	lun 11/10/10	vie 29/10/10
	Instalación de Blender	1/50	1 día	lun 11/10/10	lun 11/10/10
	Estudio de Blender	1/50	3 días	mar 12/10/10	jue 14/10/10
	Creación del Modelo 3D del Remero	1/50	3 días	vie 15/10/10	mar 19/10/10
	Creación del Modelo 3D del Remoergómetro	1/50	2 días	mié 20/10/10	jue 21/10/10
	Exportación del Modelo 3D del Remero a Panda 3D	1/50	2 días	vie 22/10/10	lun 25/10/10
	Exportación del Modelo 3D Remoergómetro a Panda 3D	1/50	2 días	mar 26/10/10	mié 27/10/10
	Generación de los movimientos del ambiente virtual usando la tarea de procesamiento por computadora	1/50	2 días	jue 28/10/10	vie 29/10/10
6%	VALIDACIÓN	3/50	5 días	lun 01/11/10	vie 05/11/10
	Contactar remero profesional	1/50	1 día	lun 01/11/10	lun 01/11/10
	Tomar 10 muestras de la realización de la técnica correcta	1/50	3 días	mar 02/11/10	jue 04/11/10
	Obtener el promedio de esas 10 ejecuciones	1/50	1 día	vie 05/11/10	vie 05/11/10
5%	PRUEBA	1/25	10 días	lun 08/11/10	vie 19/11/10
	Contactar atletas amateur o en formación	1/50	1 día	lun 08/11/10	lun 08/11/10
	Evaluación de la corrección de la técnica de trabajo terminal	1/50	9 días	mar 09/11/10	vie 19/11/10

COTIZACIÓN ESTIMADA DEL PROYECTO TERMINAL

DESCRIPCIÓN	IMPORTE CAN	TOTAL	PROVEEDOR
Modulo Bluetooth	\$ 950.00	1 \$ 950.00	COSAS DE INGENIERIA
Pila recargable de Ion-Litio	\$ 145.00	1 \$ 145.00	COSAS DE INGENIERIA
MAX1555	\$ 80.00	1 \$ 80.00	COSAS DE INGENIERIA
ADXL 345 BREAKOUT	\$ 550.00	1 \$ 550.00	COSAS DE INGENIERIA
ITG-3200 BREAKOUT	\$ 800.00	1 \$ 800.00	COSAS DE INGENIERIA
Placa Fenólica 10x10	\$ 15.00	1 \$ 15.00	STEREN
ATMEGA328	\$ 100.00	1 \$ 100.00	AG
Base troquelada 28P	\$ 10.00	1 \$ 10.00	AG
Cable Plano 10 Hilos	\$ 10.00	1 \$ 10.00	AG
borneras	\$ 5.00	1 \$ 5.00	MINIROBOT
Tira sencilla de headers	\$ 5.00	1 \$ 5.00	AG
Tira sencilla hembra	\$ 20.00	2 \$ 40.00	AG
Conector 10 Hilos	\$ 2.00	2 \$ 4.00	AG
capacitor 33pF	\$ 3.00	2 \$ 6.00	AG
Resistencias	\$ 0.20	5 \$ 1.00	SISCOM
Programador AVR	\$ 370.00	1 \$ 370.00	MERCADOLIBRE
Cristal 20	\$ 10.00	1 \$ 10.00	AG
		\$ 3,091.00	

Índice alfabético

- I^2C , 83
abducción, 91
acelerómetro, 78
acondiciona, 20
aducción, 91
Alemania, 23
anatómica, posición, 63
anfiatrósicas, 90
antropométrico, 143
antropometría, 24, 105
Argentina, 18
armadura, 127
articulación, 67, 90
ASCII, 82
Atmega48, 75
avatar, 131
AVR, 75

biomecánica, 21, 58
bipedestación, 63
Blender, 88
Bluetooth, 80
Bluetooth SIG, 81
Boston, Massachusetts, 19
BSD, 88

Cambridge, 18
cinemática, 36
cloergómetro, 23
COI, 18
complemento-2, 78
comunicación inalámbrica, 143
CONCEPT2, 19
condiciona, 20
coriolis, 76
CRASH-B, 19
cuantitativo, 31

cuantificación, 31
cuaternión, 42
Denavit-Hartenberg, 49
diagrama eléctrico, 112
diferencias finitas, método de, 52
dimensión, 36
dinámica, 36
DOF, 90
Dreissigacker, Peter y Dick, 19
DSP, 145

Eagle, 87
electroestimulación, 23
embarcación, 17
Enschede, Suecia, 26
entrenador, 33
entrenamiento, 20
ergonomía, 24
España, 18
espacio vectorial, 41
esqueleto humano, 63, 67
ETSI, 81
Euler, ecuación, 53
Euler, Leonhard, 56
exoesqueleto, 25
extensión, 91

FIFO, 78
filtros adaptativos, 145
FISA, 18
flexión, 91
fotogrametría, 24
FPGA, 145

GDL, 90
giróscopo, 76
GNU, 88
GPS, 145

Hamilton, William Rowan, 42
hardware, 143
Harvard, arquitectura, 75
Henley Royal Regatta, 18
HID, 145
host, 78
IDE, 88
indoor, 18
Inglaterra, 18
interrupción, 116
investigación científica, 21
IPAD, 145
ISM, banda, 80
kbps, 82
lógica difusa, 145
Li-Po, 86
Londres, 18
LSB, 78
LyX, 87
módem, 80, 115
móvil, 60
magnetómetro, 145
magnitud, 36
Matlab, 88, 133, 144
matriz de rotación, 44
MAX1555, 86
mecánica, 35
MEMS, 76
microcontrolador, 33, 75
MikroC Pro, 88
modelo biónico, 143
monoplaza, 17
motor gráfico, 131
movimiento, 35
multiplataforma, 88
Oxford, 18
Panda 3D, 88
pass key, 119
PCB, 87
pitch, 57
planos anatómicos, 65
polling, 116
popa, 18
Portugal, 18, 27
posiciones relativas, 64
potenciómetro, 25
puerto serie, 82
Python, 87
ranking, 20
regatas, 18
remo, 17
remoergómetro, 19, 23, 137
RFCOMM, 81
robot, 66
roll, 57
rotación, 45
RS-232, 82
segmento corporal, 62, 89, 106
semidúplex, 80
sensor de flexión, 145
sistema biológico, 67
sistema de tiempo real, 145
sistemas biológicos, 21
SPP Bluetooth, 118
SPP, perfil, 81
Támesis, 18
técnica de remo, 69
técnica deportiva, 68
Tait-Bryan, 56, 57
teléfonos celulares, 145
timonel, 17
transceptor, 80
transductor, 110
traslación, 61
Turín, 18
UPIICSA, 12
UPIITA, 121
USART, 80, 82, 119
Vermont, USA, 19
video-grabación, 33
visión artificial, 33, 145
yaw, 57