



# ESPE

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS  
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

## DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA

### CARRERA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA

#### TRABAJO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO MECATRÓNICO

TEMA: CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO DE BRAZO  
ROBÓTICO DE 7 GDL TELEOPERADO MEDIANTE CAPTURA  
DE MOVIMIENTO INERCIAL

GRANDA RAMOS ANDRÉS ALEJANDRO  
QUIÑÓNEZ ANGULO LENIN BYRON

DIRECTOR: ING. ORTIZ HUGO

SANGOLQUÍ – ECUADOR

2016



**ESPE**  
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS  
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA**  
**CARRERA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA**

**CERTIFICACIÓN**

Certifico que el trabajo de titulación, "CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO DE BRAZO ROBÓTICO DE 7 GDL TELEOPERADO CON CAPTURA DE MOVIMIENTO INERCIAL", ha sido revisado en su totalidad y analizado por el software anti-plagio, el mismo cumple con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad de Fuerzas Armadas ESPE, por lo tanto me permito acreditarlo y autorizar a los señores: Andrés Alejandro Granda Ramos y Lenin Byron Quiñónez Angulo para que lo sustenten públicamente.

Sangolquí, 16 de Mayo de 2016.

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'H. Ortiz', is written over a horizontal line.

Ing. Hugo Ortiz  
DIRECTOR



**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA**  
**CARRERA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA**

**AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD**

Nosotros, Andrés Alejandro Granda Ramos con CI: 1715816144 y Lenin Byron Quiñónez Angulo con CI: 0704418375, declaramos que este trabajo de titulación "CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO DE BRAZO ROBÓTICO DE 7 GDL TELEOPERADO CON CAPTURA DE MOVIMIENTO INERCIAL", ha sido desarrollado considerando los métodos de investigación existentes, así como también se ha respetado los derechos intelectuales de terceros considerándose en las citas bibliográficas. Consecuentemente declaramos que este trabajo es de nuestra autoría, en virtud de ello nos declaramos responsables del contenido, veracidad y alcance de la investigación mencionada.

Sangolquí, 16 de Mayo de 2016.

---

Andrés Granda

---

Lenin Quiñónez



**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA**  
**CARRERA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA**

**AUTORIZACIÓN**

Nosotros Andrés Alejandro Granda Ramos y Lenin Byron Quiñónez Angulo autorizamos a la Universidad de las Fuerzas Armadas - ESPE publicar en la biblioteca virtual de la institución el presente trabajo de titulación "CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO DE BRAZO ROBÓTICO DE 7 GDL TELEOPERADO CON CAPTURA DE MOVIMIENTO INERCIAL", cuyo contenido, ideas y criterios son de nuestra exclusiva responsabilidad y autoría.

Sangolquí, 16 de Mayo de 2016.

---

Andrés Granda

---

Lenin Quiñónez

## DEDICATORIA

Este trabajo está dedicado principalmente a mis padres a quienes agradezco el apoyo y el amor incondicional que me han dado no solo durante el transcurso de los años de universidad sino durante toda mi vida. Soy el producto de su esfuerzo y la proyección de su ser. Gracias por regalarme todo lo que soy.

*ANDRÉS ALEJANDRO*

Dedico todo esto a mi Familia, gracias a mis padres Mártires y Bella por su dedicación, esfuerzo y confianza; a mis hermanos Marcos, Paul, Patricio, Carlos X., Carlos A., Paola y Leonardo que ha sido mi inspiración en cada momento para poder continuar día a día y cumplir con este OBJETIVO FAMILIAR.

*LENIN BYRON*

## **AGRADECIMIENTO**

Agradezco a todas las personas que han estado a mi lado y me han inspirado a cumplir mis sueños. Mi familia, que gracias a su ejemplo me han regalado las herramientas para poder desempeñarme en la vida y cumplir mis sueños. A mis amigos, con quienes he compartido momentos importantes de mi vida recorriendo el camino para alcanzarlos y finalmente a la persona más importante de mi vida la cual es la razón por la que mis sueños existen.

*ANDRÉS ALEJANDRO*

Agradezco a mi Familia, mis Padres, Hermanos, Sobrinos, Primos, Tíos, a mis Abuelos porque son todo para mí y también a mis amigos que me acompañaron a lo largo de mi vida universitaria, GRACIAS.

*LENIN BYRON*

Agradecemos al Ing. Ortiz y al Ing. Loza por su ayuda y colaboración en el desarrollo del presente proyecto.

## ÍNDICE GENERAL

<b>CERTIFICACIÓN .....</b>	<b>II</b>
<b>AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD .....</b>	<b>III</b>
<b>AUTORIZACIÓN.....</b>	<b>IV</b>
<b>DEDICATORIA .....</b>	<b>V</b>
<b>AGRADECIMIENTO .....</b>	<b>VI</b>
<b>ÍNDICE GENERAL .....</b>	<b>VII</b>
<b>ÍNDICE DE TABLAS .....</b>	<b>XI</b>
<b>ÍNDICE DE FIGURAS.....</b>	<b>XIII</b>
<b>RESUMEN .....</b>	<b>XVII</b>
<b>ABSTRACT.....</b>	<b>XVIII</b>
<b>CAPÍTULO 1.....</b>	<b>1</b>
<b>INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>1</b>
1.1 ANTECEDENTES.....	1
1.2 JUSTIFICACIÓN E IMPORTANCIA.....	2
1.3 ALCANCE .....	4
1.4 OBJETIVOS.....	6
1.4.1 General .....	6
1.4.2 Específicos.....	6
1.5 DESCRIPCIÓN GENERAL DEL PROYECTO .....	7
1.6 ESTRUCTURA DE LA TESIS .....	7
<b>CAPÍTULO 2.....</b>	<b>8</b>
<b>ESTADO DEL ARTE .....</b>	<b>8</b>
2.1 BRAZO HUMANO .....	8
2.1.1 Biomecánica de la extremidad superior.....	9

2.2	ROBÓTICA DE MANIPULADORES.....	16
2.2.1	Definición (Barrientos, Peñin, Balaguer, & Aracil, 2011) .....	16
2.2.2	Historia .....	16
2.2.3	Clasificación .....	17
2.2.4	Manipuladores robóticos .....	20
2.3	SISTEMAS DE CAPTURA DE MOVIMIENTO .....	20
2.3.1	Historia .....	21
2.3.2	Clasificación de los sistemas MoCap (García, 2011) .....	23
2.3.3	Principales tecnologías (MoCap, s.f.) .....	24
2.4	SISTEMA DE CAPTURA DE MOVIMIENTO INERCIAL (MOCAP, S.F.) .....	28
2.4.1	Sensores medición inercial .....	29
2.4.2	Sensores Flex .....	30
2.5	SISTEMAS DE TELEOPERACIÓN.....	31
2.5.1	Teleoperación .....	32
2.5.2	Elementos de un sistema de teleoperación .....	32
2.5.3	Telerobótica .....	33
2.5.4	Control en la teleoperación .....	34
2.6	INTEL EDISON.....	34
2.7	TRASMISIÓN DE DATOS.....	34
2.7.1	Sistemas de comunicación eléctricos electrónicos.....	34
2.7.2	Elementos de un sistema de comunicación electrónico .....	35
2.8	INTERFAZ HUMANO MÁQUINA .....	36
2.8.1	Software HMI .....	36
2.8.2	Tipos de HMI (interfaz humano máquina) .....	37
	<b>CAPÍTULO 3.....</b>	<b>38</b>
	<b>DISEÑO.....</b>	<b>38</b>
3.1	DESPLIEGUE DE LA FUNCIÓN DE CALIDAD (QFD).....	38
3.2	IDENTIFICACIÓN DE SISTEMAS .....	40
3.2.1	Sistema mecánico.....	40
3.2.2	Sistema electrónico.....	40
3.2.3	Sistema de software.....	41
3.2.4	Sistema de brazaletes .....	41
3.3	DISEÑO Y SELECCIÓN DE ELEMENTOS MECÁNICOS .....	41
3.3.1	Estructura de brazo humanoide.....	42
3.3.2	Efactor Final.....	47
3.3.3	Base del robot .....	48

3.4	ANÁLISIS ESTÁTICO .....	49
3.4.1	Análisis cuerpo rígido general.....	50
3.4.2	Análisis estático 1 .....	55
3.4.3	Análisis estático 2 .....	57
3.4.4	Análisis estático 3 .....	58
3.4.5	Análisis estático 4 .....	59
3.4.6	Análisis estático 5 .....	60
3.4.7	Análisis de factor de seguridad.....	61
3.5	ANÁLISIS CINEMÁTICO Y DINÁMICO .....	62
3.5.1	Modelamiento en Matlab.....	62
3.5.2	Análisis cinemático.....	67
3.5.3	Análisis dinámico .....	79
3.6	DIMENSIONAMIENTO Y SELECCIÓN DE ACTUADORES .....	85
3.7	ENSAMBLAJE DEL BRAZO ROBÓTICO .....	91
3.7.1	Ensamble del hombro .....	91
3.7.2	Ensamble del codo.....	95
3.7.3	Ensamble de la muñeca .....	96
3.7.4	Ensamble de la base robótica.....	97
3.7.5	Ensamble final.....	98
3.7.6	Posición Home .....	99
3.7.7	Zona de trabajo .....	100
3.8	DISEÑO Y SELECCIÓN COMPONENTES ELECTRÓNICOS.....	101
3.8.1	Selección de sensores para Mocap.....	102
3.8.2	Convertidor analógico digital.....	103
3.8.3	Adquisición de datos de sensores .....	104
3.8.4	Controladores de potencia para actuadores.....	104
3.8.5	Bloque Base.....	105
3.9	FUENTE DE ALIMENTACIÓN ELÉCTRICA.....	105
3.9.1	Fuente AC .....	105
3.9.2	Fuente de alimentación para servomotores .....	106
3.9.3	Fuente para sensores Mocap .....	106
3.10	DISEÑO DEL SISTEMA DEL BRAZO ROBÓTICO .....	107
3.10.1	Arquitectura del sistema robótico.....	107
3.10.2	Unidades inerciales.....	108
3.10.3	Fusión sensorial para unidad de medición inercial IMU .....	110
3.10.4	Filtro complementario basado en cuaterniones.....	115
3.10.5	Sensor FLEX resistivo.....	120

3.10.6	Topología de red inalámbrica .....	121
3.11	SOFTWARE DE CONTROL.....	124
3.11.1	Arquitectura de control .....	126
3.11.2	Adquisición de datos .....	127
3.11.3	Filtro complementario.....	135
3.11.4	Interfaz de usuario humano máquina .....	140
3.11.5	Resolución de cinemática inversa .....	149
3.11.6	Control de actuadores.....	151
3.12	SISTEMA DE BRAZALETES PARA UNIDADES INERCIALES .....	158
<b>CAPÍTULO 4.....</b>		<b>160</b>
<b>PRUEBAS Y RESULTADOS .....</b>		<b>160</b>
4.1	PRUEBA DE ORIENTACIÓN.....	160
4.1.1	Movimiento de flexión del hombro .....	160
4.1.2	Movimiento de abducción del hombro .....	161
4.1.3	Movimiento de flexión y extensión horizontal del hombro .....	161
4.1.4	Movimiento de rotación interna y externa del brazo .....	161
4.1.5	Movimiento de flexión del codo.....	162
4.1.6	Movimiento de flexión y extensión vertical de la muñeca.....	162
4.1.7	Movimiento de flexión y extensión horizontal de la muñeca.....	163
4.1.8	Movimiento supinación de muñeca.....	163
4.1.9	Resultados prueba de orientación .....	164
4.2	PRUEBA DE VELOCIDAD .....	165
4.3	PRUEBA DE TIEMPOS DE RESPUESTA.....	166
4.4	PRUEBA DE MANIPULACIÓN DE OBJETOS .....	168
4.5	PRUEBA DE CARGA MAXIMA.....	171
4.6	PRUEBA DE PROCESAMIENTO COMPUTACIONAL.....	172
4.6.1	Máquina principal .....	172
4.6.2	Máquina inercial .....	174
4.6.3	Máquina robot .....	175
4.7	PRUEBA DE FRECUENCIAS.....	176
4.8	COSTOS DEL PROYECTO .....	178
<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....</b>		<b>181</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA .....</b>		<b>183</b>

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1	Especificaciones round Base .....	43
Tabla 2	Especificaciones quad hub mount 90° .....	43
Tabla 3	Especificaciones aluminum channel .....	44
Tabla 4	Especificaciones hub spacer.....	45
Tabla 5	Especificaciones servo gearbox ensamble .....	46
Tabla 6	Especificaciones standard ServoBlocks .....	47
Tabla 7	Especificaciones de la pinza paralela .....	47
Tabla 8	Especificaciones del perfil rectangular.....	49
Tabla 9	Especificaciones dela plancha de aluminio .....	49
Tabla 10	Resumen análisis estático .....	61
Tabla 11	Especificaciones HS-5685 MH .....	89
Tabla 12	Especificaciones servo gearbox ensamble HS-5685MH.....	89
Tabla 13	Especificaciones HS-5495 HB .....	90
Tabla 14	Especificaciones HS-322HD .....	90
Tabla 15	Comparación torque .....	91
Tabla 16	Especificaciones IMU.....	102
Tabla 17	Especificaciones sensor Flex.....	103
Tabla 18	Potencias de servomotores .....	106
Tabla 19	Resultados de error promedio para Pitch, Roll y Yaw .....	116
Tabla 20	Asignación de nombres en archivo Hosts .....	123
Tabla 21	Rangos de medición .....	129
Tabla 22	Frecuencia de muestreo sensor IMU.....	131
Tabla 23	Magnetómetro de referencia.....	133
Tabla 24	Datos para calibración .....	134
Tabla 25	Mensaje Imu9DOF .....	135
Tabla 26	Parámetros filtro complementario ROS .....	139
Tabla 27	Trama de mensaje GUI control robot 7GDL .....	148
Tabla 28	Valores para stopTime1 de PWM .....	153
Tabla 29	Resultados prueba de orientación .....	164
Tabla 30	Tiempo de respuesta HMI control manual.....	165
Tabla 31	Análisis velocidades.....	166
Tabla 32	Tiempo desplazamiento articulaciones.....	166
Tabla 33	Tiempo de respuesta desplazamiento articulaciones.....	167
Tabla 34	Velocidad promedio usada en la prueba .....	167
Tabla 33	Tiempo promedio de retardo a 60 grad/seg .....	168

Tabla 34	Manipulación objetos .....	169
Tabla 35	Carga máxima.....	172
Tabla 36	Costos del proyecto .....	178
Tabla 37	Especificaciones Robot.....	180

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1	Partes de la extremidad superior .....	8
Figura 2	Plano anatómico .....	9
Figura 3	Movimiento de Abducción.....	10
Figura 4	Movimiento de Aducción.....	11
Figura 5	Movimiento de Flexión .....	11
Figura 6	Movimiento de Extensión.....	12
Figura 7	Movimiento Flexión – Extensión horizontal .....	12
Figura 8	Movimiento de Rotación Interna – Externa .....	13
Figura 9	Movimiento flexión extensión del codo .....	14
Figura 10	Movimiento pronación y supinación.....	14
Figura 11	Movimiento Flexión – Extensión .....	15
Figura 12	Movimiento de desviación .....	15
Figura 13	Robot Humanoide Nao .....	17
Figura 14	Robot móvil Summit XL .....	18
Figura 15	Robot ASIMO.....	18
Figura 16	Robot de servicios .....	19
Figura 17	Robot KR AGILUS .....	19
Figura 18	Traje electromecánico .....	24
Figura 19	Sensores y rastreadores electromagnéticos .....	25
Figura 20	Traje especial con indicadores .....	26
Figura 21	Guante de fibra óptica .....	27
Figura 22	Wiimote de Nintendo .....	29
Figura 23	Sensor Inercial .....	29
Figura 24	Sensor Flex.....	30
Figura 25	Modelo de un sistema de comunicaciones genérico.....	35
Figura 26	Matriz QFD.....	39
Figura 27	Round base.....	42
Figura 28	Quad hub mount 90°.....	43
Figura 29	Aluminum Channel .....	44
Figura 30	Hub spacer.....	45
Figura 31	Servo gearbox ensamble.....	45
Figura 32	Standard ServoBlocks .....	46
Figura 33	Pinza paralela .....	47
Figura 34	Base del robot.....	48
Figura 35	Análisis cuerpo rígido preliminar.....	51

Figura 36	Análisis cuerpo rígido flexión hombro.....	52
Figura 37	Análisis estático zona de importancia .....	53
Figura 38	Piezas zona de importancia.....	55
Figura 39	Análisis estático 1 .....	56
Figura 40	Análisis estático 2 .....	57
Figura 41	Análisis estático 3 .....	58
Figura 42	Análisis estático 4 .....	59
Figura 43	Análisis estático 5 .....	60
Figura 44	Uso de bloques: Joint Actuator y Joint Sensor.....	64
Figura 45	Puntos de conexión de subsistema .....	64
Figura 46	Subsistema SM ROBOT 7GDL .....	65
Figura 47	Subsistema ROBOT 7GDL.....	66
Figura 48	Subsistema Parallel Gripper .....	66
Figura 49	Sistema de referencia .....	68
Figura 50	Señal de entrada .....	80
Figura 51	Articulación 1 .....	81
Figura 52	Articulación 2 .....	81
Figura 53	Articulación 3 .....	82
Figura 54	Articulación 4 .....	83
Figura 55	Articulación 5 .....	84
Figura 56	Articulación 6 .....	84
Figura 57	Articulación 7 .....	85
Figura 58	Distribución de servos y eslabones .....	86
Figura 59	DCL servo1 .....	86
Figura 60	DCL servo2.....	87
Figura 61	Máximo torque servo3 .....	87
Figura 62	DCL servo3.....	88
Figura 63	DCL servo4.....	88
Figura 64	Articulación 1 hombro .....	92
Figura 65	Articulación 2 hombro .....	92
Figura 66	Articulación 3.1 hombro .....	93
Figura 67	Articulación 3.2 hombro .....	93
Figura 68	Articulación 1 y 2 hombro .....	94
Figura 69	Hombro brazo robótico .....	94
Figura 70	Articulación 1 codo .....	95
Figura 71	Acople spacer .....	95
Figura 72	Ensamble codo .....	96
Figura 73	Ensamble muñeca .....	96

Figura 74	Base reforzada.....	97
Figura 75	Acople round base.....	97
Figura 76	Ensamble codo hombro.....	98
Figura 77	Ensamble brazo.....	98
Figura 78	Brazo robótico.....	99
Figura 79	Zona de trabajo.....	100
Figura 80	Sistema de control.....	101
Figura 81	Intel Edison 9DOF IMU.....	102
Figura 82	Sensor Flex.....	103
Figura 83	Intel Edison ADC block.....	104
Figura 84	Intel Edison.....	104
Figura 85	Intel Edison PWM.....	105
Figura 86	Intel Edison Base Block.....	105
Figura 87	Intel Edison batería.....	107
Figura 88	Arquitectura general.....	108
Figura 89	Bloques para unidad inercial.....	109
Figura 90	Unidad inercial 3.....	109
Figura 91	Sistema de referencia unidad inercial.....	110
Figura 92	Sistema de referencia en Brazo.....	110
Figura 93	Principales variables a obtener de un sensor IMU.....	111
Figura 94	Proceso de fusión sensorial.....	112
Figura 95	Resultados de valores estimados y medidos Pitch.....	116
Figura 96	Comparación de medición para Roll.....	117
Figura 97	Comparación de medición para Pitch.....	117
Figura 98	Comparación de medición para Yaw.....	118
Figura 99	Filtro complementario usando magnetómetro.....	120
Figura 100	Divisor de Voltaje.....	121
Figura 101	Topología de red.....	122
Figura 102	Estructura de nodos y topics del sistema ROS.....	125
Figura 103	Arquitectura control de software.....	126
Figura 104	Arquitectura control de general.....	126
Figura 105	Algoritmo de adquisición de datos.....	127
Figura 106	Algoritmo de filtro complementario.....	137
Figura 107	Interfaz gráfica general.....	140
Figura 108	Algoritmo GUI.....	141
Figura 109	GUI control robot 7GDL.....	142
Figura 110	Simulación RVIZ.....	144
Figura 111	Formato de descripción robótico URDF.....	145

Figura 112	Simulación RVIZ - RobotModel .....	146
Figura 113	Simulación RVIZ - TF .....	146
Figura 114	Simulación RVIZ - Imu .....	147
Figura 115	Algoritmo controlador de movimiento .....	149
Figura 116	Algoritmo PWM .....	151
Figura 117	Equivalencia entre grados y variable stopTime1 .....	154
Figura 118	Ecuación recta .....	155
Figura 119	Sistema de brazaletes .....	158
Figura 120	Brazaletes 1 y 2 .....	159
Figura 121	Brazaletes 3 .....	159
Figura 122	Flexión del hombro .....	160
Figura 123	Abducción del hombro .....	161
Figura 124	Flexión y extensión del hombro .....	161
Figura 125	Rotación interna y externa del brazo .....	162
Figura 126	Flexión del codo .....	162
Figura 127	Flexión y extensión de la muñeca vertical .....	163
Figura 128	Flexión y extensión de la muñeca horizontal .....	163
Figura 129	Supinación muñeca .....	164
Figura 130	Manipulación de objetos .....	168
Figura 131	Manipulación de objetos redondos .....	169
Figura 132	Manipulación de objetos grandes .....	170
Figura 133	Manipulación de objetos livianos .....	170
Figura 134	Uso CPU de máquina principal .....	173
Figura 135	Uso CPU de máquina Inercial .....	175
Figura 136	Uso CPU de máquina Robot .....	176
Figura 137	Estadísticas frecuencias nodos y topics .....	177
Figura 138	MTw Development Kit de Xsens .....	179

## **RESUMEN**

Se han desarrollado algunos robots teleoperados en las últimas décadas, todos con el objetivo de proporcionar una función útil a los seres humanos. Muchos de estos han tratado de imitar sustancialmente el comportamiento del movimiento humano y una de las formas de controlarlos ha sido mediante sistemas de captura de movimiento. Como complemento a la teleoperación de robots a distancia, se ha visto conveniente el desarrollo de robots humanoides o de forma humana, debido a esto, se vuelve imprescindible el desarrollo de tecnologías de teleoperación más eficaces y confiables, de tal manera que el operador pueda desempeñarse acorde con la complejidad de la tarea a ser realizada por el robot. La implementación del presente proyecto de investigación abre las puertas para la telerobótica, complementado con un sistema de captura de movimiento inercial, implementado en un manipulador robótico humanoide, de manera que estas puedan integrarse para beneficiar al operador. El tipo de prototipo realizado es didáctico y funcional, consta de un brazo robótico humanoide que imita en tiempo real el movimiento del operador gracias al sistema de captura de movimiento. Ejemplos recientes ilustran su posible aplicación en robots que van desde desarmar bombas o manejar materiales peligrosos hasta la exploración espacial. La tecnología en la telerobótica está en constante desarrollo para aumentar la facilidad de uso e interacción con los robots teleoperados por lo que se justifica la investigación en esta rama particular de la robótica.

### **PALABRAS CLAVES**

- **TELEOPERACIÓN**
- **TELEROBÓTICA**
- **SISTEMA DE CAPTURA DE MOVIMIENTO**
- **ROBOT HUMANOIDE**

## **ABSTRACT**

It has developed some teleoperated robots in recent decades, all of them with the aim of providing a useful function to humans. Many of these have attempted to mimic the behavior of human movement and one of the ways of control has been by motion capture systems. Complementing the teleoperation of remote robots, It seems convenient the development of humanoid robots or with human form, because of this, it becomes essential to develop technologies more efficient and reliable for remote operation, in this way the operator can perform according to the complexity of the task assigned to the robot. The implementation of this research project opens doors for telerobotics, supplemented by an inertial motion capture system, implemented in a humanoid robot manipulator, therefor these can be integrated to benefit the operator. The kind of prototype developed is didactic and functional, consists of a humanoid robot arm that mimics real-time operator movement through the motion capture system. Recent examples illustrate its possible application in robots ranging from disarming bombs or handle hazardous materials to space exploration. Telerobotics technology is constantly developing to increase the ease of use and interaction with teleoperated robots, because of this the research is justified in this particular area of robotics.

### **KEYWORDS**

- **TELEOPERATION**
- **TELEROBOTICS**
- **MOTION CAPTURE SYSTEM**
- **HUMANOID ROBOT**

## **CAPÍTULO 1.**

### **INTRODUCCIÓN**

#### **1.1 ANTECEDENTES**

Se ha desarrollado algunos robots humanoides en las últimas décadas, todos con el objetivo de proporcionar una función útil a los seres humanos. Muchos de estos han tratado de imitar sustancialmente el comportamiento del movimiento humano, siendo los proyectos más representativos el robot ASIMO (Honda, 2003), este representa años de investigación en muchas áreas científicas como matemáticas, física y anatomía por nombrar algunas.

También se han desarrollado robots teleoperados con sistemas de captura de movimiento como es el robot MAHRU (Instituto de Ciencia y Tecnología de Korea (KIST), 2009) el cual puede imitar los movimientos de un operador humano de dos formas posibles, la una es mediante el tradicional sistema de captura de movimiento óptico donde el operador usa un traje con marcas visibles para la cámara y el otro método es mediante un sistema de captura de movimiento inercial.

El proyecto “Teleoperation of a humanoid robot using full-body motion capture, example movements, and machine learning” (Stanton, Bogdanovych, & Ratanasena, 2012) usa un sistema de captura de movimiento inercial de cuerpo completo de alta precisión Xsens MVN, el cual es usado para teleoperar el robot humanoide Nao de Aldebaran Robotics, que imita el movimiento en tiempo real del operador, este proyecto desarrolla a su vez un sistema de control de redes neuronales artificiales para encontrar las relaciones entre el movimiento del operador y el robot.

Desde los inicios de la teleoperación en 1951, cuando Goertz desarrolló un manipulador mecánico maestro esclavo para trabajar con material radioactivo. Ejemplos recientes ilustran su uso en robots que van desde desarmar bombas hasta exploración espacial como sucede con el Mars Rover, robot teleoperado en Marte. La tecnología en la telerobótica está en constante desarrollo para aumentar la facilidad de uso e interacción con los robots teleoperados.

## **1.2 JUSTIFICACIÓN E IMPORTANCIA**

Dentro de los objetivos principales que funcionan como un eje estratégico de la Secretaría de Educación Superior, Ciencia, Tecnología e Innovación del Ecuador, se impulsa la Innovación Tecnológica en el sector productivo industrial del país. Esto, debido a la ventaja competitiva que representa el desarrollo tecnológico visto internacionalmente.

“Fomentar la innovación y transferencia de tecnología en áreas estratégicas, priorizadas para incrementar la productividad y competitividad, con un enfoque de responsabilidad social, de modo que transformen al Ecuador en una sociedad de conocimiento, que enfrente los desafíos globales en el marco de un Sistema Nacional de Innovación consolidado.” (Secretaría de Educación Superior, 2013)

La teleoperación es la operación o control de un robot a distancia, siendo el propósito de esto, el preservar la integridad física del operador, si fuera expuesto a un entorno remoto u hostil. Es aquí donde el uso de un robot se vuelve no solamente necesario, sino útil, debido a la capacidad en el desempeño que un robot puede proporcionar.

Como complemento a la teleoperación de robots a distancia, se ha visto conveniente el desarrollo de robots humanoides o de forma humana, “La mayoría de interacciones de conducta entre un robot humanoide y un ser humano se desarrollan por voces y comportamientos. Tales comportamientos tienen que parecerse a los humanos, de lo contrario pueden causar que la

gente entienda el significado de las conductas de forma incorrecta” (Kim, Kim, & Park, 2009).

De igual forma “los problemas en el desempeño humano involucrados en la teleoperación de sistemas no tripulados generalmente caen en dos categorías, percepción remota y manipulación remota” (Chen, Hass, & Barnes, 2007).

Debido a esto, se vuelve imprescindible el desarrollo de tecnologías de teleoperación más eficaces y confiables, de tal manera que el operador pueda desempeñarse acorde con la complejidad de la tarea a ser realizada por el robot.

Se necesita más investigación en el área de captura de movimiento utilizado en la teleoperación de robots humanoides. Se busca alcanzar una alta capacidad de interacción en tiempo real para controlar el movimiento de los robots humanoides. De esta manera el robot puede seguir los movimientos de un operador en vez de necesitar ser programado, para cumplir con la tarea.

Esta tecnología puede llegar a ser útil dentro de múltiples campos que van desde militar, espacial e industrial, siendo éste último motivo de investigaciones posteriores para evaluar su aplicación en la Industria Ecuatoriana.

Los laboratorios pertenecientes al Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica de la Universidad de las Fuerzas Armadas del Ecuador, a pesar de contar con distintos tipos de robots comerciales y prototipos realizados por la comunidad universitaria, como pueden ser de tipo brazo antropomórfico, polar, cartesiano, etc., no cuentan con manipuladores robóticos comerciales de tipo humanoide. Por lo que el prototipo a ser desarrollado en el presente proyecto servirá como una herramienta didáctica importante en esta área de investigación particular, así como una herramienta base con la cual se pueda contar para la implementación de futuros proyectos utilizando parcial o integralmente los sistemas del proyecto de investigación.

Resumiendo, únicamente la implementación física funcional de un brazo robótico de tipo humanoide, abre el campo para proyectos posteriores complementarios o independientes al sistema de captura de movimiento. En este caso se podría tomar solamente el manipulador robótico y reprogramarlo para una aplicación distinta.

De igual forma se podría tomar solamente el sistema de captura de movimiento inercial, para ser adaptado a un manipulador robótico de una configuración morfológica distinta, como puede ser un robot de tipo: antropomórfico, esférico, cilíndrico, etc.

La implementación del presente proyecto de investigación abre las puertas para la línea de investigación de telerobótica, utilizando el acercamiento particular del sistema de captura de movimiento inercial, así como la línea de investigación en la robótica humanoide, de manera que estas dos puedan unirse para aportar sustancialmente la aplicación del uso de robots en áreas de aplicación peligrosas para un ser humano, donde el objetivo principal es precautelar su salud o integridad física.

### **1.3 ALCANCE**

La investigación pretende desarrollar un sistema de captura de movimiento el cual pueda otorgar la capacidad de realizar el seguimiento de orientación en tiempo real de un operador humano. Es decir el robot imitará los movimientos del operador el cual puede estar situado en un sitio remoto como en un sitio local. Se utilizará una tecnología de comunicación de datos inalámbrica para facilitar la operación del robot en el área remota o local.

El manipulador robótico será de configuración humanoide para facilitar la interacción del operador con el robot. De esta manera la relación entre la cinemática del manipulador maestro y el esclavo tendrán una correspondencia real aproximada. Debido a que el manipulador maestro forma parte del mismo operador, es decir se ocupa como maestro la extremidad superior humana, se elimina la necesidad de construir un

manipulador maestro artificial como se realiza en un sistema de teleoperación maestro esclavo convencional.

El proyecto está limitado a su aplicación, la cual en este caso es la investigación en el área de telerobótica utilizando el sistema de captura de movimiento inercial. Debido a esto, el tipo de prototipo a ser realizado es didáctico y funcional.

Al ser un prototipo didáctico y funcional, se omite en el diseño general y especialmente en el sistema mecánico, características que se deben tomar en cuenta en un prototipo final para su posible comercialización. El objetivo a cumplir se limita al uso de un prototipo físico que pueda desempeñar el movimiento necesario para la evaluación del seguimiento en tiempo real.

Un prototipo funcional hace referencia a un prototipo de tipo físico y enfocado, donde los prototipos enfocados se definen como aquellos que “realizan uno, o pocos, de los atributos de un producto” (Ulrich, 2013). En este caso el principal atributo a ser evaluado en el presente proyecto es su funcionalidad.

De manera similar se califica como didáctico al prototipo debido a que su razón de ser, está enfocada para la enseñanza e investigación en el Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica de la Universidad de las Fuerzas Armadas del Ecuador. Por esta razón, características de robustez en un marco de diseño Industrial escapan del alcance del presente proyecto.

Es necesario la simulación de un modelo cinemático del manipulador robótico para validar parámetros importantes en el proceso general de diseño. El algoritmo de control recibe la señal del sistema de captura de movimiento el cual transmite la posición en tiempo real del manipulador maestro. El algoritmo de control cotejará los datos de entrada con la señal de control de los actuadores mediante una función de correspondencia.

El sistema de captura de movimiento se lo implementará con el método de medición inercial, es decir que se utilizará módulos construidos en base a giroscopios, acelerómetros y magnetómetros. El sistema consta de tres módulos inerciales que se ubicarán en el hombro, antebrazo y muñeca para cubrir los 7 GDL del brazo humano. Los mismos contarán con tecnología inalámbrica, peso liviano y dimensiones reducidas para mayor flexibilidad de uso por parte del operador, características importantes en un sistema que se integrará en la extremidad superior de un operador humano.

## **1.4 OBJETIVOS**

### **1.4.1 General**

Diseñar y construir un prototipo de brazo robótico humanoide de 7GDL que sea operado mediante un sistema de captura de movimiento inercial.

### **1.4.2 Específicos**

- Diseñar y construir un prototipo didáctico y funcional de brazo robótico humanoide.
- Implementar un sistema de captura de movimiento inercial de bajo costo que pueda competir con otros sistemas que se comercializan actualmente.
- Realizar el modelamiento y simulación del sistema mecánico mediante software como parte del proceso de diseño.
- Desarrollar e implementar una interfaz de comunicación humano maquina HMI para el control del brazo robótico
- Desarrollar e implementar una simulación gráfica de movimiento del manipulador robótico.
- Desarrollar e implementar un controlador para la teleoperación del robot usando el sistema de captura de movimiento inercial.

## **1.5 DESCRIPCIÓN GENERAL DEL PROYECTO**

El proyecto Diseño y Construcción de un prototipo de brazo robótico de 7 GDL teleoperado mediante captura de movimiento inercial para la construcción del brazo robótico de 7 GDL, se desarrolló utilizando elementos mecánicos de la plataforma Actobotics que es un sistema de construcción para robótica que permitió desarrollar una estructuras mecánica para nuestro brazo de una forma rápida y sencilla.

Para el movimiento de cada una de sus articulaciones con cada grado de libertad se utiliza servomotores Hitec. Para poder replicar el movimiento del operador en tiempo real se ha utilizado un Microcontrolador Intel Edison que es capaz de adquirir, los datos enviados desde el sensor IMU y mediante tecnológica inalámbrica Wifi transmitiendo los datos adquiridos a un controlador principal, el cual recepta los datos recibidos de las 3 unidades inerciales para luego ser procesados por el algoritmo programado en el sistema operativo ROS que permita realizar la réplica del movimiento.

## **1.6 ESTRUCTURA DE LA TESIS**

En el CAPÍTULO 1 se hablará sobre antecedentes generales de este proyecto con respecto a proyectos relacionados; también se dará una explicación de la importancia que tiene el mismo en la rama de la investigación y se concluirá con el alcance; es decir los objetivos del proyecto. En el CAPÍTULO 2 se tocaran puntos relevantes para desarrollar la teoría que va a fundamentar el proyecto con base al planteamiento del problema que se ha realizado, se encontrara fuentes documentales que permitan detectar, extraer y recopilar la información de interés para construir el marco teórico pertinente al proyecto de investigación planteado. En el CAPÍTULO 3 se encontraran los puntos más relevantes de hardware y software del sistema en conjunto, el diseño mecánico, electrónico y de control del proyecto. Finalmente en el CAPÍTULO 4 se dará a conocer las pruebas y resultados obtenidos tras la elaboración del este proyecto.

## CAPÍTULO 2.

### ESTADO DEL ARTE

#### 2.1 BRAZO HUMANO

El brazo es un miembro superior del cuerpo humano (Anatomía, 2012), también llamado extremidad superior; el cuerpo tiene dos extremidades superiores que se encuentran ubicadas en la parte superior del tronco y además cubren toda la zona desde el hombro hasta los dedos de la mano; entre la cual se distinguen cuatro secciones: la mano, el antebrazo, el brazo, y la cintura escapular (Figura 1).

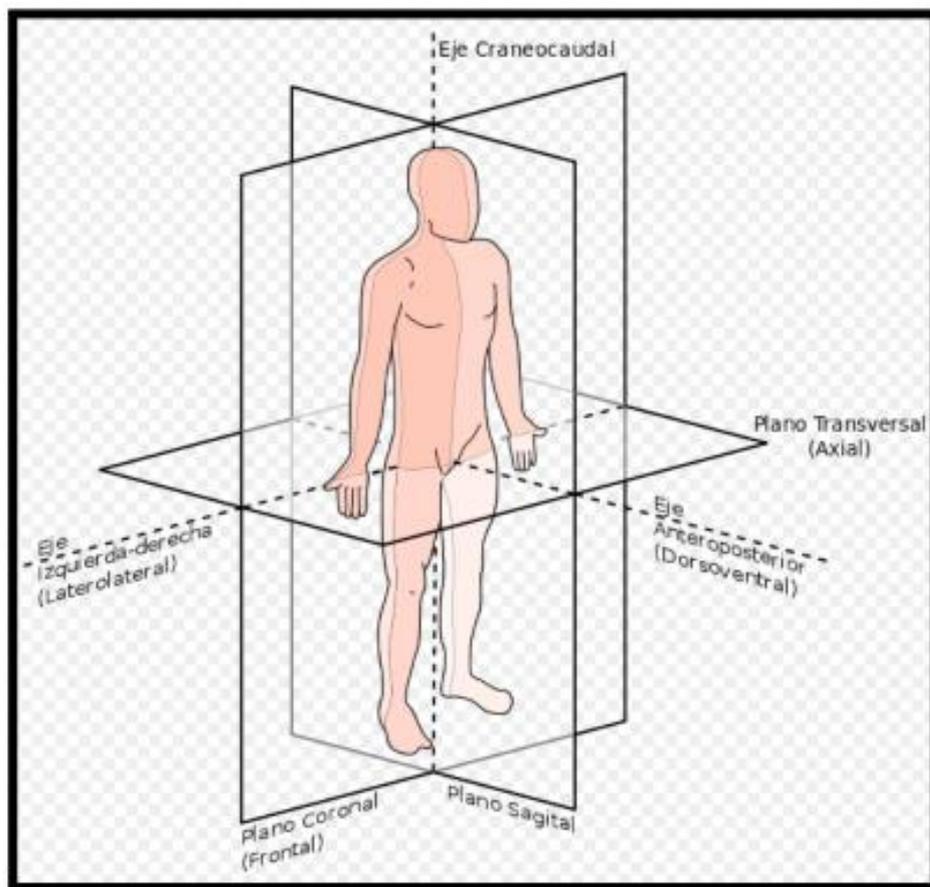


**Figura 1 Partes de la extremidad superior**  
Fuente: (Biomecánica del miembro superior, 2011)

### 2.1.1 Biomecánica de la extremidad superior

La extremidad superior tiene un movimiento en tres dimensiones, donde cada segmento del mismo va tomando posiciones y orientaciones diferentes en el espacio conforme se vaya haciendo algún tipo de movimiento.

Generalmente los movimientos del cuerpo humano se hacen referencia con respecto a un plano anatómico (Wikipedia, 2011) donde se distinguen tres planos: frontal o coronal, sagital y transversal (Figura 2); los mismos que permiten hacer una descripción anatómica tanto interna como externa del cuerpo humano.



**Figura 2 Plano anatómico**

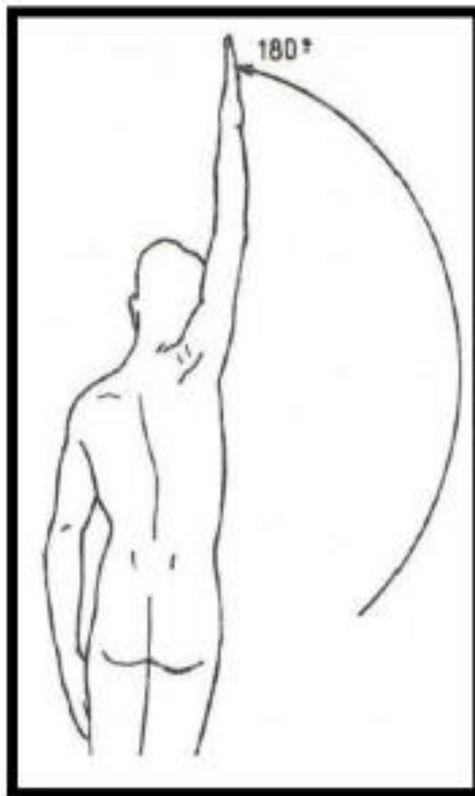
Fuente: (Biomecánica del miembro superior, 2011)

Se presenta a continuación cada uno de los movimientos realizados por la extremidad superior:

### a. Hombro

El hombro básicamente define una articulación esférica, la cual permite una gran variedad de movimientos del húmero en el espacio, de los cuales se tienen:

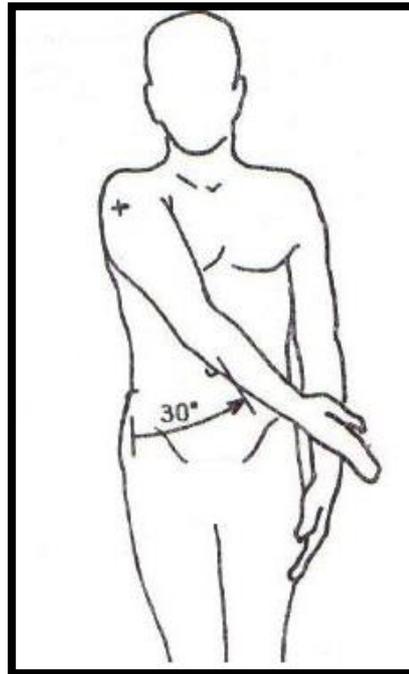
**Abducción:** es el movimiento permitido por la articulación glenohumeral, y se efectúa en el plano frontal y en el eje anteroposterior (Figura 3), su rango angular es de  $180^\circ$  pero requiere del movimiento de rotación externa para llegar a los  $180^\circ$ .



**Figura 3 Movimiento de Abducción**

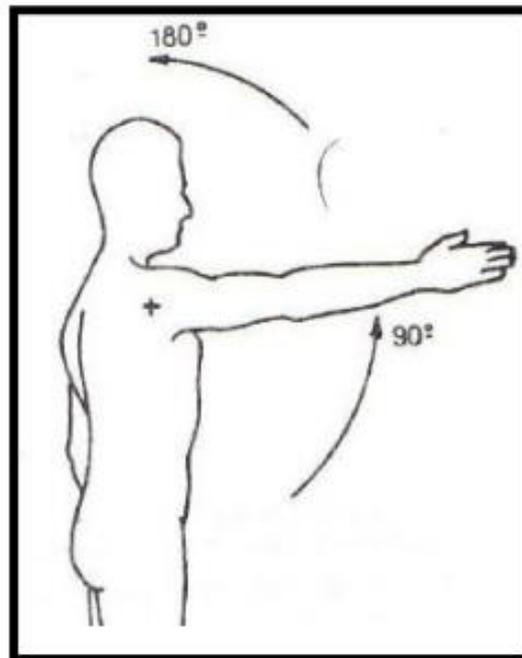
Fuente: (Biomecánica del miembro superior, 2011)

**Aducción:** al igual que el movimiento anterior, este movimiento se desarrolla en el plano frontal y en el eje anteroposterior (Figura 4), y su rango angular está entre  $30^\circ$  a  $45^\circ$  dependiendo del individuo.



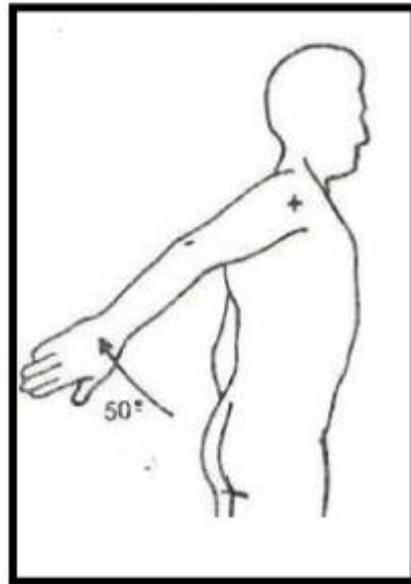
**Figura 4 Movimiento de Aducción**  
Fuente: (Biomecánica del miembro superior, 2011)

**Flexión:** se desarrolla en el plano sagital y en el eje transversal (Figura 5), su rango angular está en los 180°.



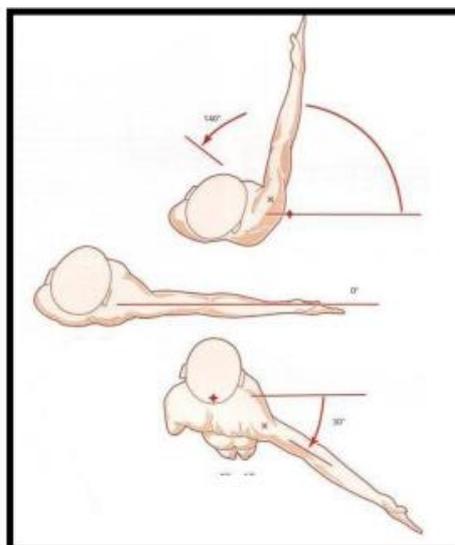
**Figura 5 Movimiento de Flexión**  
Fuente: (Biomecánica del miembro superior, 2011)

**Extensión:** es efectuado en el plano sagital y en el eje transversal (Figura 6), y su rango angular está entre  $45^\circ$  a  $60^\circ$ .



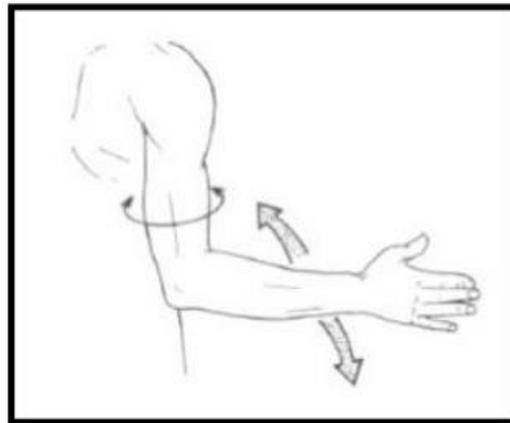
**Figura 6 Movimiento de Extensión**  
Fuente: (Biomecánica del miembro superior, 2011)

**Flexión – Extensión Horizontal:** se efectúa en un plano horizontal y en un eje vertical, su rango angular es de  $140^\circ$  para la flexión humeral y de  $30^\circ$  a  $40^\circ$  para la extensión humeral, tomando como referencia una abducción de  $90^\circ$  por parte del hombro (Figura 7).



**Figura 7 Movimiento Flexión – Extensión horizontal**  
Fuente: (Biomecánica del miembro superior, 2011)

**Rotación:** es un movimiento que se lleva a cabo en cualquier posición del espacio y en el eje longitudinal del húmero, adicionalmente se considera dicho movimiento cuando el codo está en un ángulo de  $90^\circ$ . Se tienen dos tipos de rotaciones: rotación interna y rotación externa. El rango de movimiento de la rotación interna es de  $100^\circ$ , y el rango de la rotación externa es de  $40^\circ$  (Figura 8).



**Figura 8 Movimiento de Rotación Interna – Externa**  
Fuente: (López, 2009)

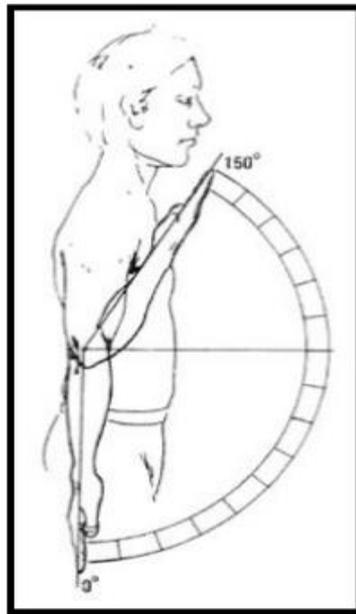
b. **Codo**

El movimiento del antebrazo viene dado por el codo, el cual es determinado por las articulaciones húmero – cubital, húmero – radial y radiocubital. Dando origen a cuatro movimientos que se exponen a continuación:

**Flexión:** considerando la posición anatómica inicial, este movimiento se desarrolla en el plano sagital por el bíceps y por las articulaciones húmerocubital y húmero-radial, su rango de movimiento es de  $135^\circ$  llegando a tocar el hombro (Figura 9).

**Extensión:** al igual que en el movimiento de flexión es un movimiento realizado en el plano sagital por los tríceps y también por las articulaciones húmero – cubital y húmero – radial, al ser una articulación de tipo bisagra su

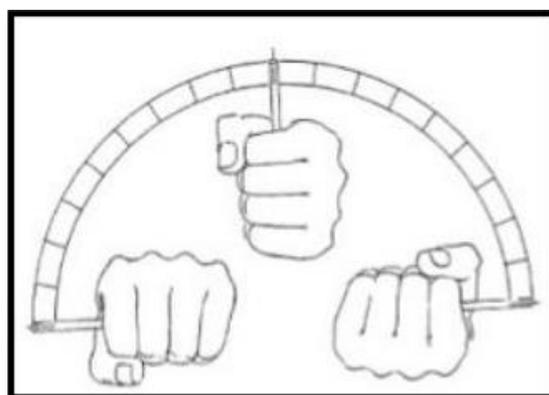
movimiento es nulo o muy poco significativo; en algunas mujeres puede tener un rango de 0° a 5° (Figura 9).



**Figura 9 Movimiento flexión extensión del codo**  
Fuente: (López, 2009)

**Supinación:** es un movimiento realizado en el plano frontal, y está dado por la articulación radiocubital (Figura 10); su rango de movimiento es de 90°.

**Pronación:** al igual que el movimiento anterior se realiza en el plano frontal, y está dado por la articulación radiocubital (Figura 10); su rango de movimiento es de 90°.

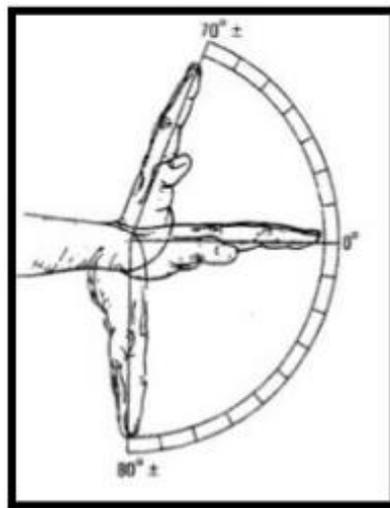


**Figura 10 Movimiento pronación y supinación**  
Fuente: (López, 2009)

### c. Muñeca

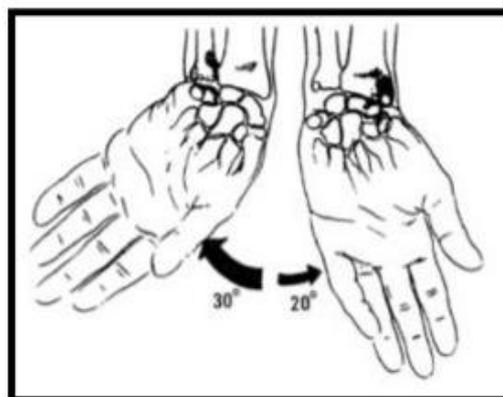
El movimiento que realiza la mano se basa en la articulación de la muñeca, la misma que se encuentra constituida por el radio, cubito y los huesos que se compone la mano; dando lugar a los siguientes movimientos.

**Flexión – Extensión:** es el movimiento realizado en el eje transversal (Figura 11) con un rango angular de  $80^\circ$  para la flexión y  $70^\circ$  para la extensión.



**Figura 11 Movimiento Flexión – Extensión**  
Fuente: (López, 2009)

**Desviación:** está constituido por dos movimientos: desviación cubital con un rango angular de  $30^\circ$  y desviación radial (Figura 12) con un rango angular de  $20^\circ$ .



**Figura 12 Movimiento de desviación**  
Fuente: (López, 2009)

## **2.2 ROBÓTICA DE MANIPULADORES**

Según el Dr. José Fernando Reyes Cortes catedrático de la Universidad Autónoma de Puebla “La robótica es una disciplina científica que aborda la investigación y desarrollo de una clase particular de sistemas mecánicos, denominados robots manipuladores, diseñados para realizar una amplia variedad de aplicaciones industriales, científicos, domésticos y comerciales”.

### **2.2.1 Definición (Barrientos, Peñin, Balaguer, & Aracil, 2011)**

Existen varias definiciones para describir un robot, entre ellas la que describe en el año de 1979 por parte de Robot Institute of America (RIA) la cual establece:

Un robot es un manipulador multifuncional reprogramable diseñado para mover materiales, partes, herramienta o dispositivos especializados a través de movimientos programados para la ejecución de una variedad de tareas.

La Asociación Internacional de Estándares (ISO) en su norma ISO 8373 define al robot manipulador industrial como:

Manipulador de 3 o más ejes, con control automático, reprogramable, móvil o no móvil, destinado a ser ocupado en aplicaciones de automatización industrial. Incluye al manipulador (sistemas mecánicos y accionadores) u al sistema de control.

### **2.2.2 Historia**

Cuando se habla de robots uno imagina a máquinas con características propias de los seres humanos, pero esto es una parte de lo que es la robótica.

Con la intención de mejorar la calidad, la productividad en la fabricación de piezas y a la vez evitar trabajos forzosos, tediosos o peligrosos para el

hombre, nacen los robots industriales. George Devol es considerado el padre de la robótica Industrial, y a él se debe la creación del primer robot industrial en 1956. A partir de esta fecha se introdujeron en varias fábricas robots dedicados a diversas funciones, gracias entre otras cosas a los progresos de la Electrónica e informática, que instalaron el microprocesador para el manejo de estas máquinas de un modo potente, flexible y económico (Angulo, 2005).

### 2.2.3 Clasificación

La clasificación presentada se ha realizado (Torres, Pomares, Gil, & Puente, 2002) en base a los robots desarrollados actualmente:

**Humanoide:** tiene apariencia humana que pretende emular el comportamiento de un humano. En la Figura 13 se observa el Robot Nao de Aldebaran Robotics, uno de los robots más utilizados con fines de investigación y educación para laboratorios y universidades de todo el mundo, en la línea de investigación de robots humanoides. El robot Nao debido a su popularidad, es utilizado como plataforma estándar para la Robocup (Copa mundial de fútbol robótico), concurso internacional de robótica de gran popularidad.



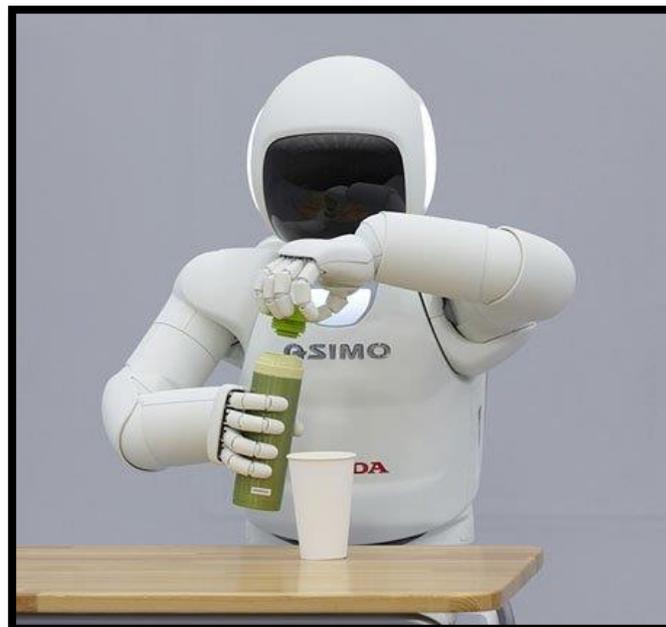
**Figura 13 Robot Humanoide Nao**  
Fuente: (ERM, 2013)

**Robot móvil:** es un robot acoplado a una superficie móvil que pueden estar provistas de patas, ruedas (Figura 14) u orugas que permiten el desplazamiento del robot en conjunto.



**Figura 14 Robot móvil Summit XL**  
Fuente: (Robotnik, 2013)

**Robot inteligente:** tiene la aptitud de movilizarse y operar en ambientes impredecibles ya que dispone de una capacidad de aprendizaje en base a un adecuado sistema de sensores (Figura 15).



**Figura 15 Robot ASIMO**  
Fuente: (Tecnomagazine, 2011)

**Robot de servicios:** robots móviles o estacionarios que son empleados para trabajar parcial o totalmente con autonomía para desempeñar servicios útiles (Figura 16).



**Figura 16 Robot de servicios**  
Fuente: (Banda2cero, 2014)

**Robot industrial:** es un manipulador creado para la movilización de materiales, herramientas o elementos especiales por medio de movimientos programados que desarrollan actividades de una manera automática (Figura 17).



**Figura 17 Robot KR AGILUS**  
Fuente: (kuka, 2014)

#### 2.2.4 Manipuladores robóticos

En la actualidad los robots industriales en su gran mayoría son brazos mecánicos (Gómez, Ollero, & García, 2006) con un sistema articulado que permite desempeñar actividades específicas, cuyos desplazamientos han sido pre-programados. En base a la definición de manipulador robótico anteriormente expuesta se puede extraer términos como:

**Manipulador:** mecanismo firme de varios segmentos y uniones, que está en la capacidad de movilizar objetos en varios grados de libertad.

**Reprogramable:** dentro de las funciones y movimientos de un manipulador, se pueden reprogramar sin la necesidad de alterar la estructura mecánica del manipulador, haciéndolo de esta manera más flexible.

**Multifuncional:** se puede adaptar a varias aplicaciones contemplando modificaciones ya sea en la estructura mecánica o en el sistema de control del manipulador.

### 2.3 SISTEMAS DE CAPTURA DE MOVIMIENTO

La captura de movimiento también llamado MoCap (Motion Capture) por sus siglas en inglés, es una manera de registrar digitalmente los movimientos humanos (Xsens, Captura de Movimiento, s.f.) Dicha información es valiosa para estudiar el comportamiento de algún objeto en el espacio o de toda la cadena cinemática de un cuerpo de una persona, animal o cosa (García, 2011).

En los comienzos para poder capturar el movimiento de algún objeto se lo realizaba mediante una secuencia de fotografías análogas y luego por medio de complejos procesos poder estimar la posición de los mismos, técnica que se le conocía como Tracking y es la base de los sistemas de captura de movimiento, pero con los avances de la electrónica, la mecatrónica y la informática se han ido implementando diversas tecnologías como cámaras infrarrojas, sensores electromecánicos o electromagnéticos,

sistemas inerciales y de ultrasonido, a tal nivel que ya existen sistemas de captura de movimiento que pueden entregar en tiempo real información para ser usada en aplicaciones de videojuegos, robótica y entrenamiento en realidad virtual.

### **2.3.1 Historia**

La idea de captar el movimiento por medios mecánicos es muy antigua. Existen antecedentes como la cámara oscura y el traumatropo, un juguete que reproducía el movimiento mediante dos imágenes.

Thomas Alva Edison, estuvo muy cerca de establecer lo que hoy se conoce como cine al patentar el kinetoscopio. Tanto así que los hermanos Lumiere inspirados en esto crearon el cinematógrafo (Zavala, 2010), hechos cruciales que fomentaron el desarrollo de los sistemas MoCap.

Los primeros sistemas de captura de movimiento fueron basados en secuencias de fotografía análoga, uno de los primeros desarrollos fue un dispositivo llamado Zoopraxiscopio , creado por Edward Muybridge en 1879 (Kitagawa & Windsor, 2008), este dispositivo se encargaba de proyectar secuencias de imágenes, que le sirvieron a Muybridge para sus publicaciones *Animals in Motion* (1899) y *The Human Figures in Motion* (1901), que hasta la actualidad son un referente valioso para el estudio del movimiento y la animación.

En 1917 Max Fleisher creó el rotoscopio (Kitagawa & Windsor, 2008), que le permitió recrear la animación de personajes en su trabajo *Koko the Clown and Fitz the dog*, años después Walt Disney empleó el rotoscopio para sus trabajos cinematográficos.

En 1926 Harold Edgerton Ingeniero estudiante del MIT empleó el estroboscopio para capturar las imágenes de un motor en movimiento aplicando frecuencias equivalentes a la velocidad de rotación, esto permitió los primeros desarrollo en fotografía de alta velocidad

En 1960, los ingenieros de Disney desarrollaron un sistema basado en captura de movimiento para programar los movimientos de robots dando inicio a un conocido concepto de la época “motion programming”. Bill Polhemus de la Universidad de Harvard en este mismo año desarrolla el primer sensor de captura de movimiento llamado Magnetic Tracker (García, 2011). Garnov y Dubovic en los mediados de los 60's propusieron un sistema para sincronizar varias cámaras a la vez debido a que cada cámara tenía un tiempo de disparo distinto para capturar las imágenes.

En los 70's se dieron grandes avances en la captura de movimiento 3D gracias a métodos matemáticos y técnicas análisis en 3D desarrollados por Susanka, Diblink y Miller. A finales de los 70's se desarrollan los primeros sistema MoCap digitales con los avances en gráficas por computadora que fueron empleados en comerciales para la tv.

A comienzos de los 80's el Architecture Machine Group del MIT y el New York Institute of Technology Computer Graphics Lab empezaron a aplicar tracking óptico en el cuerpo humano empleando marcas fijadas en el cuerpo que eran leds. En 1985 Robert Abel, creó un sistema MoCap que empleaba 18 segmentos marcados con puntos negros sobre el cuerpo de una modelo y fotografías tomadas desde diversos ángulos que permitían recrear el movimiento en 3D, luego el movimiento capturado fue empleado para dar vida a un robot femenino tridimensional para un comercial. En el mismo año Tom Calvert, un profesor de kinesiología de la Simon Fraser University empleó potenciómetros adheridos al cuerpo de los pacientes para analizar anomalías motrices, los datos análogos de los potenciómetros eran digitalizados y pasados a la computadora para representarlos en gráficas de movimiento, aceleración y velocidad.

Dando el auge e interés en los 80's por los sistemas de captura de movimiento se crean empresas como Northern Digital desarrolladores de MoCap Óptico, Vicon, Peak Performance, Biomechanics inc, BTS Bioengineering.

A comienzos de los 90's se incursionó en la captura de movimiento facial, uno de los primeros trabajos presentados fue el de la compañía SimGraphics que era un sistema que permitía a un actor manipular la cara de un personaje usando sus propias expresiones faciales. También hubo varios avances importantes en los sistemas Mocap del cuerpo, surgieron sistemas ópticos de captura en tiempo real como el desarrollado por Motion Reallity que permitió capturar el movimiento del cuerpo entero de una sola persona (García, 2011).

La primera década del 2000 dio lugar a nuevos desarrollos, Motion Análisis logró crear un sistema de Mocap que soportaba hasta 32 cámaras, esto permitió lograr mejor precisión y detalle en los movimientos capturados. A finales de la primera década del 2000 Xsens lanza un sistema de traje para Mocap inercial y Organic Motion introduce su sistema de captura de movimiento sin marcas llamado 'Open stage' (Motion, 2011), Motion Análisis desarrolla un sistema que puede soportar hasta 150 cámaras y permite capturar el movimiento de tres personas con alta precisión. A finales del 2010 Microsoft lanza Kinect, para XBox, el cual es un sistema de control para videojuegos que se basa en MoCap y no requiere marcas y permite interactuar en tiempo real.

### **2.3.2 Clasificación de los sistemas MoCap (García, 2011)**

Algunos autores como F.J. Perales del grupo de visión y gráficas computacionales de la Universidad de les Illes Balears, proponen una clasificación de los sistemas Mocap de la siguiente forma:

1) Sistemas outside-in: Son sistemas que emplean sensores externos que captan información de fuentes colocadas en el cuerpo. Como por ejemplo un sistema óptico pasivo que tiene cámaras (sensores externos) y se encarga de captar la información dada por marcas reflexivas (fuente).

2) Sistemas Inside-out: Son sistemas que tiene los sensores ubicados sobre el cuerpo, dichos sensores captan información de fuentes externas al

cuerpo. Un ejemplo de este tipo es un sistema electromagnético en el cual los sensores están ubicados en el cuerpo que se mueve en un campo magnético generado externamente.

3) Inside-in: Son sistemas que tienen su propia fuente y sensores puestos en el mismo cuerpo. Los trajes electromecánicos o inerciales para tracking son ejemplo de esta clase.

### 2.3.3 Principales tecnologías (MoCap, s.f.)

#### Captura de movimientos electromecánica

Los sistemas de captura de movimiento electromecánicos (Figura 18) son aquellos sistemas en los que, en general, la captura de movimiento se realiza utilizando sensores mecánicos.



**Figura 18 Traje electromecánico**

Fuente: (MoCap, s.f.)

En el proceso de captura de movimientos, el actor o intérprete viste unos trajes especiales, adaptables al cuerpo humano. Los trajes son generalmente estructuras rígidas compuestas de barras metálicas o plásticas unidas mediante potenciómetros colocados en las principales articulaciones.

El actor coloca la estructura en su cuerpo y mientras se mueve el traje se adapta a sus movimientos, y los potenciómetros recogen datos sobre el grado de apertura de las articulaciones. Un sistema electromecánico completo tiene un precio comprendido entre 25000 y 75000 dólares.

### **Captura de movimientos electromagnética**

En los sistemas de captura de movimiento electromagnéticos se dispone de una colección de sensores electromagnéticos (Figura 19) que miden la relación espacial con un transmisor cercano. Los sensores se colocan en el cuerpo y se conectan a una unidad electrónica central, casi siempre mediante cables. Están constituidos por tres espiras ortogonales que miden el flujo magnético, determinando tanto la posición como la orientación del sensor.



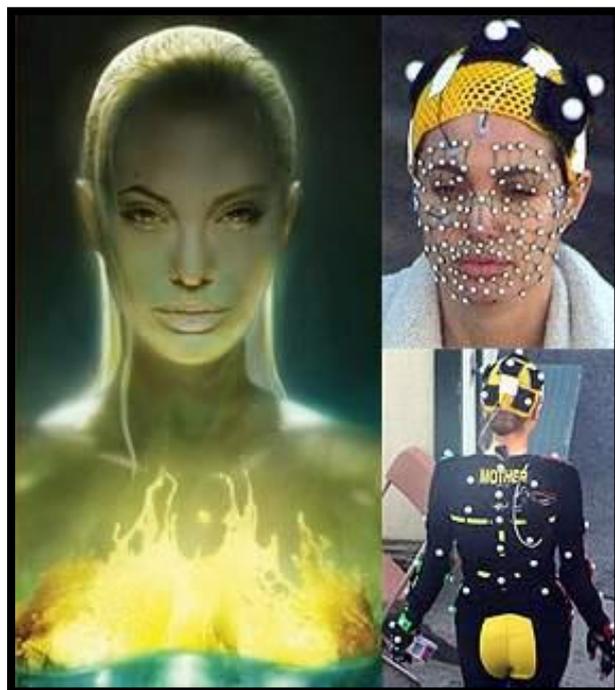
**Figura 19 Sensores y rastreadores electromagnéticos**

Fuente: (MoCap, s.f.)

Un transmisor genera un campo electromagnético de baja frecuencia que los receptores detectan y transmiten a la unidad electrónica de control, donde se filtra y amplifica. Después se envía a un ordenador central, donde se infiere la posición de todos los sensores en el espacio así como su orientación. El coste de estos sistemas varía de 5000 a 15000 dólares, lo cual supone un importante ahorro con respecto a los sistemas ópticos.

## Captura óptica de movimiento

Los sistemas ópticos utilizan los datos recogidos por sensores de imagen para inferir la posición de un elemento en el espacio, utilizando una o más cámaras sincronizadas para proporcionar proyecciones simultáneas. Lo habitual es que los datos se recojan utilizando indicadores (markers) pegados al actor (Figura 20), pero los sistemas más recientes permiten recoger datos fiables rastreando superficies del sujeto identificadas dinámicamente. Son en general métodos muy fiables para capturar determinados movimientos cuando se utilizan sistemas de última generación. Además, permiten la grabación en tiempo real, con ciertas limitaciones como el número de indicadores, el número de actores y de cámaras.



**Figura 20 Traje especial con indicadores**  
Fuente: (MoCap, s.f.)

Los sistemas ópticos más habituales se basan en un único ordenador que recibe la entrada de varias cámaras digitales CCD (charge-coupled device). Cuanto mayor sea la resolución mejor será la captura. El número de cámaras se comprende habitualmente entre 4 y 32. Aunque sería suficiente

con dos cámaras para obtener la posición de cualquier indicador y los precios de estos sistemas van de 50000 a 100000 dólares.

### **Captura mediante fibra óptica**

Los primeros sistemas de este estilo son los guantes de fibra óptica, pero en la actualidad se intenta aplicar esta técnica a la captura de movimientos del cuerpo entero. Los guantes de fibra óptica (Figura 21) están constituidos por un conjunto de fibras ópticas que, al doblarse, atenúan la luz transmitida, permitiendo calcular la posición de los dedos de la mano. El primer ejemplo de sistema de este tipo es el Dataglove.



**Figura 21 Guante de fibra óptica**  
Fuente: (MoCap, s.f.)

Para captura de movimientos del cuerpo, se fijan sobre distintas partes del cuerpo sensores flexibles de fibra óptica que miden las rotaciones de las articulaciones. Al igual que los sistemas electromecánicos, no se mide la posición del actor en el escenario. El sistema se puede complementar con sistemas electromagnéticos para medir la posición de la cabeza y el torso.

### **Captura mediante ultrasonidos**

En general, en los sistemas de captura de movimientos mediante ultrasonidos se utilizan emisores que generan pulsos ultrasónicos (imperceptibles por los seres humanos) que son capturados por uno o varios receptores situados en posiciones conocidas, permitiendo averiguar la posición del emisor en el espacio, e incluso su orientación en algunos casos.

Los emisores utilizados son todavía demasiado voluminosos y los sistemas actuales no son capaces de trabajar con movimientos bruscos. Estos sistemas se suelen combinar con sistemas inerciales. Sin embargo, el uso de sistemas ultrasónicos permite obtener un importante ahorro con respecto a otros sistemas de captura de movimientos, ya que en algunos prototipos, el precio actual es inferior a 3000 dólares.

#### **2.4 SISTEMA DE CAPTURA DE MOVIMIENTO INERCIAL (MOCAP, S.F.)**

Los sistemas inerciales (utilizan unos pequeños sensores, normalmente acelerómetros y giroscopios que recogen información sobre la aceleración y la velocidad angular del sensor. Conociendo la posición y la velocidad angular inicial e integrando las informaciones que recogen los sensores, es posible determinar la posición, eje de giro y velocidad angular de cualquier sensor. Los datos recogidos por los sensores inerciales (inertial guidance system) se transmiten a un ordenador, donde se puede observar sobre una figura animada el movimiento completo registrado. En los sistemas inerciales puros puede producirse el problema de la deriva de integración (integration drift: los errores numéricos se acumulan sobre la velocidad u orientación del sensor), por lo cual es común combinar esta técnica con otros métodos de captura.

Este tipo de sistemas de captura de movimiento no utiliza mecanismos externos como cámaras; y como en el caso de los sistemas ópticos, cuantos más sensores se utilicen, más real es el movimiento reproducido. Son fáciles de transportar y tienen grandes rangos de captura.

Uno de los sistemas más conocidos de este tipo son los mandos inalámbricos de la Nintendo Wii (Figura 22), si bien para captura de movimiento se emplean otros sensores mucho más precisos y con mayor frecuencia de captura, generalmente acoplados a unos trajes especiales con varios sensores y en donde se ubica también una unidad transmisora.



**Figura 22 Wiimote de Nintendo**  
Fuente: (MoCap, s.f.)

Existen trajes de prestaciones muy variadas cuyos precios básicos varían entre 25000 y 80000 dólares.

#### **2.4.1 Sensores medición inercial**

Un sensor inercial (Figura 23) es un dispositivo capaz de sensor los movimientos físicos que puede adoptar un objeto y que pueden relacionarse con la aceleración, y se utiliza en aplicaciones de captura y análisis de movimiento.



**Figura 23 Sensor Inercial**  
Fuente: (Xsens, Captura de Movimiento, s.f.)

Los sensores inerciales (Groves, 2007) comprenden acelerómetros y giroscopios. Un acelerómetro mide la fuerza específica y un giroscopio mide la velocidad angular, ambos sin una referencia externa. Dispositivos que

miden la velocidad, la aceleración, o la velocidad angular de un cuerpo con respecto a las características del entorno no son sensores inerciales.

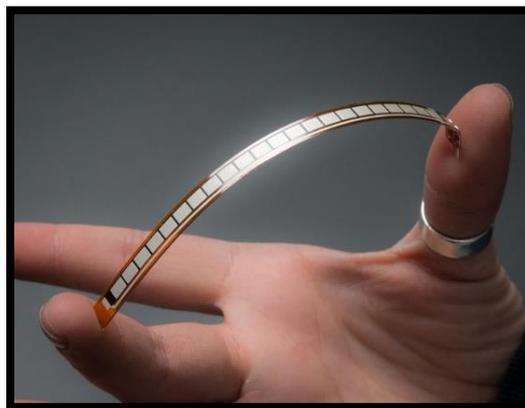
La mayoría de los tipos de acelerómetros midan la fuerza específica a lo largo de un eje sensible. Del mismo modo, la mayoría de los tipos de giroscopios miden la velocidad angular alrededor de un solo eje. Una unidad de medición inercial (IMU) combina múltiples acelerómetros y giroscopios, generalmente tres de cada uno, para producir una medición de tres dimensiones de la fuerza específica y velocidad angular.

El desarrollo actual del sensor inercial se centra en la tecnología MEMS (micro-electro-mechanical systems). Los sensores MEMS son pequeños, ligeros, y muestran una mayor tolerancia a los golpes que los diseños convencionales mecánicos.

#### **2.4.2 Sensores Flex**

Los sensores Flex (Figura 24) son sensores flexo resistivos que cambian su resistencia dependiendo de la cantidad de doblez que presenten. Convierten el cambio de flexión en valor de resistencia, es decir que a más doblez la variación de la resistencia es mayor.

Estos sensores usualmente tienen forma de una tira delgada de 1 a 5 pulgadas de longitud que varían en resistencia (Khwaja, 2013).



**Figura 24 Sensor Flex**  
Fuente: (Adafruit, 2013)

Puede ser usados de manera unidireccional donde solo pueden ser doblados en una dirección teniendo como resultado el aumento de la resistencia, o de manera bidireccional donde dependiendo de la dirección de flexión la resistencia puede aumentar o disminuir.

Su funcionamiento radica en que trabajan como un divisor variable de voltaje. El sensor está compuesto de elementos resistivos de carbono dentro de una lámina flexible de substrato. Más carbono significa menos resistencia.

Cuando el substrato es flexionado el sensor produce una salida de resistencia relativa al radio de curvatura.

## **2.5 SISTEMAS DE TELEOPERACIÓN**

También, se habla de telemanipulación cuando el operador controla un dispositivo específico de manipulación, tal como un brazo articulado con una pinza, en una localización remota, o de teleguiado, cuando el operador realiza una tarea como la de guiado de un vehículo sin conductor.

Supuesto que en los dispositivos mencionados existen actuadores, tales como motores que generan sus movimientos, se utiliza también el término de teleactuación para referirse a los aspectos específicos de generación de órdenes a los actuadores. Así mismo, se habla de telesensorización para referirse a la captación y visualización de información sensorial en la localización remota.

La intervención del operador puede producirse en muchas formas diferentes, desde la teleoperación directa de los actuadores de las articulaciones de un brazo manipulador, hasta la simple especificación de movimientos, o incluso de tareas, las cuales se realizan de forma automática empleando para ello los sistemas informáticos de control en la estación de teleoperación y en la localización remota.

### 2.5.1 Teleoperación

Se entiende por teleoperación (Gómez, Ollero, & García, 2006) la extensión de las capacidades sensoriales y destrezas humanas a una localización remota. También, se habla de telemanipulación cuando el operador controla un dispositivo específico de manipulación, tal como un brazo articulado con una pinza, en una localización remota, o de teleguiado, cuando el operador realiza una tarea como la de guiado de un vehículo sin conductor. Supuesto que en los dispositivos mencionados existen actuadores, tales como motores que generan sus movimientos, se utiliza también el término de teleactuación para referirse a los aspectos específicos de generación de órdenes a los actuadores. Así mismo, se habla de telesensorización para referirse a la captación y visualización de información sensorial en la localización remota. La intervención del operador puede producirse en muchas formas diferentes, desde la teleoperación directa de los actuadores de las articulaciones de un brazo manipulador, hasta la simple especificación de movimientos, o incluso de tareas, las cuales se realizan de forma automática empleando para ello los sistemas informáticos de control en la estación de teleoperación y en la localización remota.

### 2.5.2 Elementos de un sistema de teleoperación

Un sistema de teleoperación (Gómez, Ollero, & García, 2006) consta de los siguientes elementos divididos en tres zonas.

**Operador o teleoperador:** es un ser humano que realiza a distancia el control de la operación. Su acción puede ir desde un control continuo hasta una intervención intermitente, con la que únicamente se ocupa de monitorizar y de indicar objetivos y planes cada cierto tiempo.

**Dispositivo teleoperado:** podrá ser un manipulador, un robot, un vehículo o dispositivo similar. Es la máquina que trabaja en la zona remota y que está siendo controlada por el operador.

**Interfaz:** conjunto de dispositivos que permiten la interacción del operador con el sistema de teleoperación. Se considera al manipulador maestro como parte del interfaz, así como a los monitores de vídeo, o 20 cualquier otro dispositivo que permita al operador mandar información al sistema (de entrada) y recibir información del mismo (de realimentación).

**Control y canales comunicación:** conjunto de dispositivos que modulan, transmiten y adaptan el conjunto de señales que se transmiten entre la zona remota y la local. 5. **Sensores:** conjunto de dispositivos que recogen la información, tanto de la zona local como de la zona remota, para ser utilizada por la interfaz y el control

### 2.5.3 Telerobótica

Los avances en la robótica (Gómez, Ollero, & García, 2006) hacen posible el desarrollo de sistemas cada vez más capaces, dotados de sensores que les permiten actuar de manera autónoma para un gran número de aplicaciones. Sin embargo, esta capacidad de decisión de los sistemas robóticos no se encuentra desarrollada al nivel requerido para ejecutar determinadas tareas sin ningún tipo de supervisión humana. Por ello resulta necesario recurrir a la teleoperación, donde una persona interviene en las acciones del robot, desde un lugar alejado o separado. Entonces se puede considerar a la telerrobótica como una forma evolucionada de la teleoperación que se caracteriza principalmente por el aumento de la capacidad de decisión y actuación en el sistema remoto por parte del operador, el cual continúa manteniendo una intervención importante para la supervisión o teleoperación directa. Una definición bastante concreta es la siguiente, “La telerrobótica se define como el conjunto de tecnologías que comprenden la monitorización y reprogramación a distancia de un robot por un ser humano. Se tendrá entonces la teleoperación de un robot, que se denominará telerrobótica o robot teleoperado.” (Barrientos, Peñin, Balaguer, & Aracil, 2007)

## **2.5.4 Control en la teleoperación**

El control dentro de la teleoperación está ligado a una operación manual o directa por parte del operador, y no a una programación a distancia, como sería el caso del control supervisado o tele-programación. A continuación se describen los conceptos principales de control en la teleoperación en un orden en el cual se comprenda de mejor manera su clasificación e inclusión dentro de los mismos.

## **2.6 INTEL EDISON**

Es un entorno de desarrollo de hardware y software de código totalmente abierto para los proyectos de creación (Intel, 2014).

El Microcontrolador single-core de alto desempeño y de CPU dual-core admite la recopilación compleja de datos en un formato de bajo consumo de energía. Las funciones integradas de Wi-Fi, Bluetooth Low-Energy\* (LE), memoria y almacenamiento simplifican la configuración y aumentan la escalabilidad. Ofrecen 40 interfaces GPIO múltiples con opciones de placas de expansión para facilitar el diseño del proyecto total y aportar flexibilidad.

Su entorno de apoyo de comunidad es administrada en línea para intercambiar ideas de proyectos e interactuar con otros usuarios del producto. Acceso a un marco de conectividad de dispositivo a dispositivo y de dispositivo a nube para habilitar la comunicación entre varios dispositivos y un servicio de análisis cronológico multi-empresa en la nube.

## **2.7 TRASMISIÓN DE DATOS**

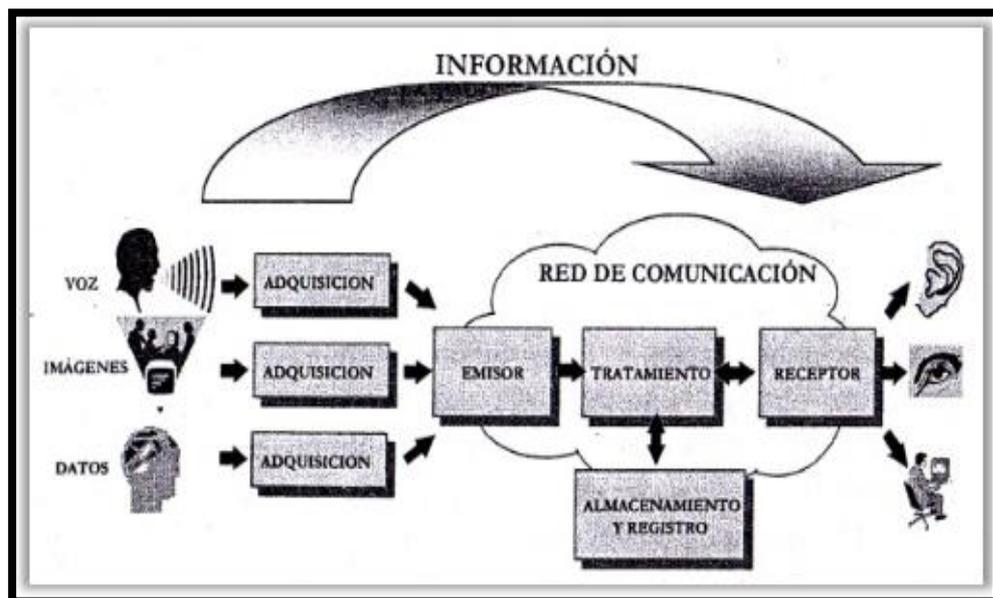
### **2.7.1 Sistemas de comunicación eléctricos electrónicos**

La comunicación (Blake, 2004) fue una de las primeras aplicaciones de la tecnología eléctrica, su práctica empezó en 1873 con el sistema del telégrafo de Samuel Morse.

De manera general es posible definir a un sistema de comunicación como aquel que tiene como finalidad transmitir información desde un origen o fuente a un destino por medio de un canal.

### 2.7.2 Elementos de un sistema de comunicación electrónico

Todos los sistemas electrónicos de comunicaciones (Frenzel, 2003) tienen los componentes básicos mostrados en Figura 25 Modelo de un sistema de comunicaciones genérico la un transmisor, un medio o canal de comunicación y un receptor. El proceso de comunicación empieza cuando alguien genera algún tipo de mensaje, datos u otra señal de inteligencia que debe ser recibida por los demás.



**Figura 25 Modelo de un sistema de comunicaciones genérico**

Fuente: (Frenzel, 2003)

El mensaje, en la forma de una señal electrónica, es alimentado al transmisor, el cual se encarga de transmitirlo por medio de un canal de comunicaciones. El mensaje es captado por el receptor y transferido a otro elemento. En este proceso se capta el ruido en el canal de comunicación y en el receptor. Ruido es el término general aplicado a cualquier fenómeno que degrada o interfiere la señal de información transmitida.

### **a. TRANSMISOR**

El primer paso para enviar un mensaje es convertirlo en una forma electrónica adecuada para su transmisión.

El transmisor por sí mismo es una colección de componentes y circuitos electrónicos diseñados para convertir la señal eléctrica en una forma adecuada para transmitirse a través de un medio de comunicación determinado. La señal original de inteligencia, modula usualmente a una portadora senoidal de mayor frecuencia generada en el transmisor, a la combinación se le aumenta la amplitud mediante amplificadores dando por resultado una señal que es compatible con el medio seleccionado para su transmisión.

### **b. RECEPTORES**

Un receptor es una colección de componentes electrónicos que acepta el mensaje transmitido del canal y lo convierte en una forma inteligible para los humanos o para el sistema destino.

## **2.8 INTERFAZ HUMANO MÁQUINA**

El HMI es un sistema que sirve de interfaz entre el humano y la máquina, estos suelen usar indicadores y comandos, pilotos, paneles, pulsadores, displays LCD, pantallas TouchScreen, etc., en la actualidad estos procesos están implementados con controladores y dispositivos electrónicos y que dejan disponibles puertas de comunicación.

### **2.8.1 Software HMI**

Los software HMI permiten realizar varias funciones entre las que se encuentran las interfaces graficas de modo de poder ver el proceso e interactuar con el registro en tiempo real de modo que se puede manejar el sistema desde una interfaz interactuando con el proceso. Al igual que en las terminales, los operadores requieren de una herramienta de diseño o

desarrollo, el cual es usado para configurar la aplicación deseada, esperando que este haga o realice el proceso desde dispositivos externos, o bien lo puede hacer por medio de una interfaz o tarjeta de adquisición de datos.

### **2.8.2 Tipos de HMI (interfaz humano máquina)**

En general se puede describir dos grandes clasificaciones: aquellas cuyo software de programación es propio de cada marca y sus limitantes están fijadas por esta misma, ejemplo de ellos serían CTC, GOT1000, Panel View.

Otras permiten una mayor versatilidad ya que trabajan en ambiente Windows y se pueden programar en lenguajes como Visual C, C++, Labview.

## **CAPÍTULO 3.**

### **DISEÑO**

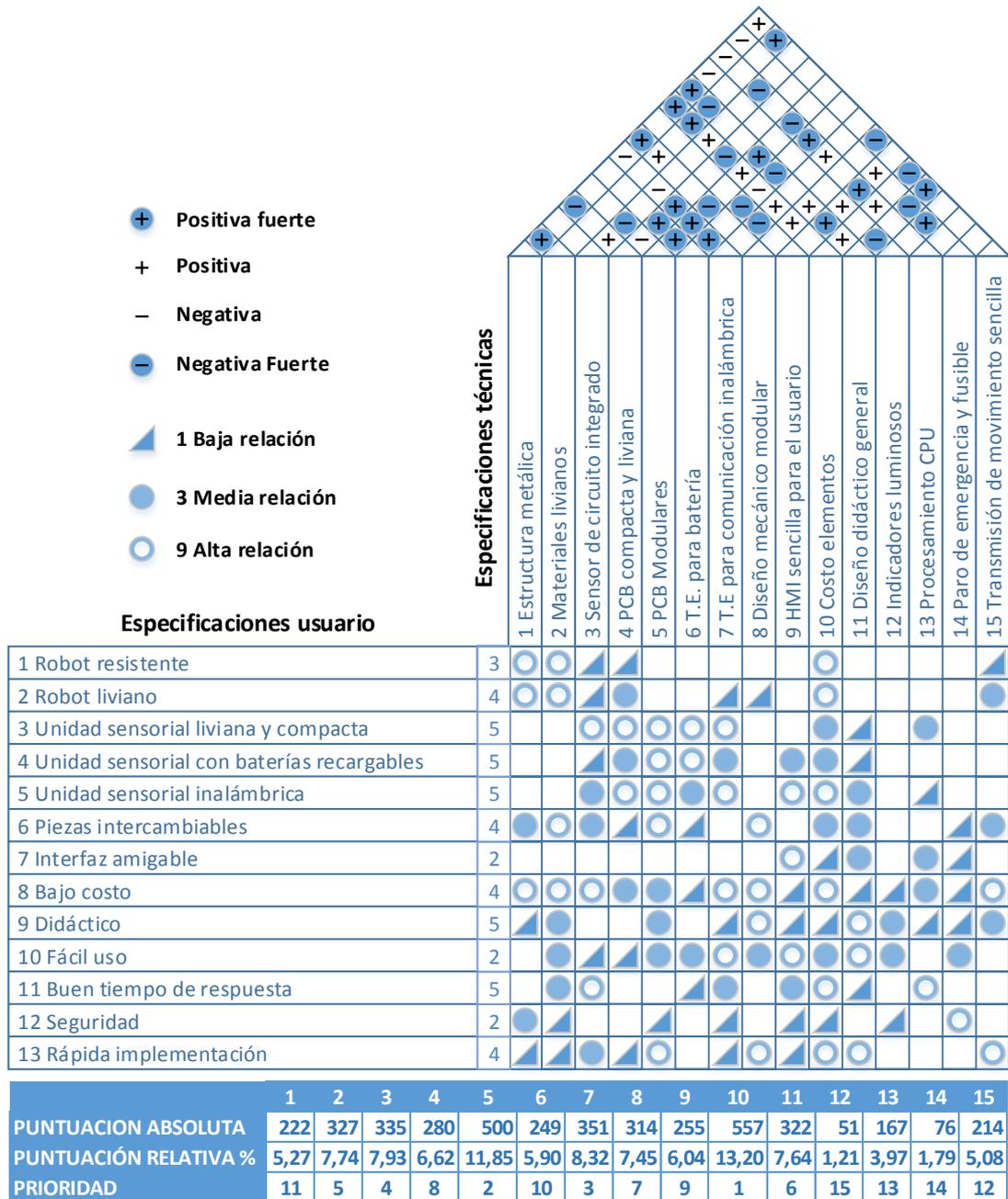
En este capítulo se explican los puntos más relevantes con respecto al hardware y software del sistema en conjunto: el proceso de ensamble del brazo robótico, el dimensionamiento de los actuadores y sensores, implementación del sistema de brazaletes y finalmente se presenta el diseño e implementación del hardware electrónico para el sistema en conjunto.

#### **3.1 DESPLIEGUE DE LA FUNCIÓN DE CALIDAD (QFD).**

A continuación se realiza el despliegue de la función de calidad (QFD) el cual servirá para enumerar y organizar los requerimientos abstractos de diseño, los cuales serán interpretados en especificaciones técnicas para el desarrollo del proyecto.

En la Figura 26 se observa en la columna vertical las especificaciones de usuario requeridas, estas provienen fundamentalmente de los objetivos específicos planteados en el proyecto. Además estos proporcionan una directiva inicial para el proceso de diseño.

En conjunto, estas especificaciones se definen como ideas abstractas, las cuales deben ser traducidas a características técnicas que finalmente influenciarán significativamente a lo largo de todo el proceso de diseño para dar solución a los requerimientos del usuario.



\*T.E: tarjeta electrónica  
 \*PCB: tarjeta de circuito impreso

**Figura 26 Matriz QFD**

De los resultados de la matriz QFD se obtiene una jerarquía de prioridad de las especificaciones técnicas que se deben tomar en cuenta. Como es de esperarse la especificación principal gira en torno al factor económico el cual tiene una prioridad de uno, este factor influye en todas las demás especificaciones.

Luego del factor económico se encontró entre las especificaciones más importantes: PCB modulares, como segunda prioridad; T.E. para comunicación inalámbrica, como tercera; sensor de circuito integrado, como cuarta; materiales livianos, como quinta y diseño didáctico general, como sexta prioridad, por nombrar las especificaciones técnicas más importantes.

## **3.2 IDENTIFICACIÓN DE SISTEMAS**

### **3.2.1 Sistema mecánico**

El sistema mecánico está compuesto principalmente por los elementos físicos que componen la cadena cinemática del manipulador robótico, donde se destacan elementos importantes como: perfiles de aluminio, acoples, engranes, etc. Además se cuenta con una base sencilla de aluminio que brinda soporte a la estructura y sostiene al manipulador robótico.

### **3.2.2 Sistema electrónico**

El sistema electrónico está compuesto principalmente por las unidades sensoriales de medición inercial, las cuales están compuestas a su vez de: un sensor inercial, controlador para adquisición y transmisión de datos y de un bloque de carga y manejo de batería.

Adicionalmente se cuenta con un controlador para el manejo de la señal PWM, que controla el movimiento del manipulador robótico.

El sistema electrónico también está compuesto por un Router dedicado para comunicación inalámbrica de todos los componentes electrónicos.

El sistema robótico esta alimentado por dos fuentes de 7.4 VDC y 5 VDC. La primera alimenta a los servomotores y la segunda se encarga de alimentar el circuito de transmisión de señal PWM.

### **3.2.3 Sistema de software**

El sistema de software está conformada principalmente por programas integrados al sistema operativo robótico ROS. Este sistema facilita el intercambio de información entre diferentes programas dedicados cada uno a una función específica. Estos programas están distribuidos a través de los diferentes controladores utilizados en el proyecto.

### **3.2.4 Sistema de brazaletes**

El sistema de brazaletes está compuesto por tres brazaletes que sostienen y dan soporte a las unidades inerciales en la ubicación necesaria en el brazo del operador para el correcto funcionamiento del sistema de captura de movimiento.

Los brazaletes están hechos de tela elástica y velcro, para adaptarse a diferentes dimensiones del brazo del operador y además el brazalete de la muñeca cuenta con un bolsillo especial para alojar a un sensor Flex-resistivo que servirá para sensar la apertura y cierre de la mano.

## **3.3 DISEÑO Y SELECCIÓN DE ELEMENTOS MECÁNICOS**

Para la construcción del sistema mecánico se ha considerado usar elementos comerciales de la plataforma Actobotics; es un sistema de construcción para robótica basado en una gran variedad de partes fundamentalmente mecánicas; gracias a los patrones de agujeros permite posibilidades de montaje ilimitadas. Todos los acoples mecánicos del brazo robótico fueron realizados mediante tornillos de rosca 6/32 de pulgada con sus respectivas tuercas y arandelas.

Uno de los objetivos específicos del proyecto es diseñar un prototipo de brazo robótico de tipo didáctico y funcional. Esto significa que su uso va estar orientado a la enseñanza en esta línea de investigación. Por tal motivo la plataforma de construcción robótica Actobotics al seguir este mismo

principio es una opción verdaderamente satisfactoria para la construcción del brazo robótico.

Una de las principales consideraciones ha sido que el brazo robótico sea de un material liviano y resistente, por lo que cumple con las especificaciones de prioridad de la matriz QFD, en este caso la mayoría de las partes de la plataforma de Actobotics son de aluminio, el cual es un metal resistente y liviano ideal para esta aplicación.

Esta plataforma permitió desarrollar la estructura mecánica del brazo humanoide de 7 GDL de una forma rápida y sencilla gracias al alcance que tiene el diseño intuitivo, tanto para un ingeniero experimentado, como para público aficionado. Con esta plataforma se diseñó la cadena cinemática que satisfaga de manera funcional el requerimiento impuesto para el diseño del manipulador robótico. Además permitirá acoplar fácilmente el efector final con el brazo robótico y la estructura soporte (base).

Se debe considerar que la cadena cinemática del brazo robótico debe conseguir movimientos similares a los realizados por un brazo humano, por lo que las dimensiones de las partes y piezas se han diseñado de tal manera que tengan una semejanza de un brazo humano real de dimensiones promedio; para esto se ha tomado como referencia una estatura promedio de 1,70 m con las dimensiones de sus extremidades proporcionales a su altura.

### **3.3.1 Estructura de brazo humanoide**

#### **3.3.1.1 Round Base**



**Figura 27 Round base**

Es una base fija estándar; de acuerdo con la especificaciones del fabricante donde se dispone acoplar un Quad Hub Mount de 90° tipo C para dar inicio y soporte al brazo robótico finalmente se la usará también para unir con la estructura base del robot.

**Tabla 1**  
**Especificaciones round Base**

Fabricante	Actobotics
Material	7075 Aluminio
Tipo	A
Modelo	585438
Diámetro	10 cm
Espesor	0.31 cm
Peso	60 gr

### 3.3.1.2 Quad Hub Mount 90°

Es un accesorio estándar según el fabricante que sirve como enlace con los demás elementos del robot como: round base, channel, hub spacer y servoblocks y además es de fácil montaje.



**Figura 28 Quad hub mount 90°**

**Tabla 2**  
**Especificaciones quad hub mount 90°**

Fabricante	Actobotics	
Material	7075 Aluminio	
Tipo	C	B
Modelo	545360	545424
Largo	3.3 cm	3.3 cm
Ancho	3.3 cm	3.3 cm
Altura	0.86 cm	0.86 cm
Peso	5.7gr	5.7gr

### 3.3.1.3 Aluminum Channel

Son perfiles estándar según el fabricante donde se pueden acoplar los Servo Gearbox con facilidad además de ser los eslabones de nuestro brazo robótico, se pueden acoplar directamente a los Servo Gearbox mediante un Quad hub mount 90°.

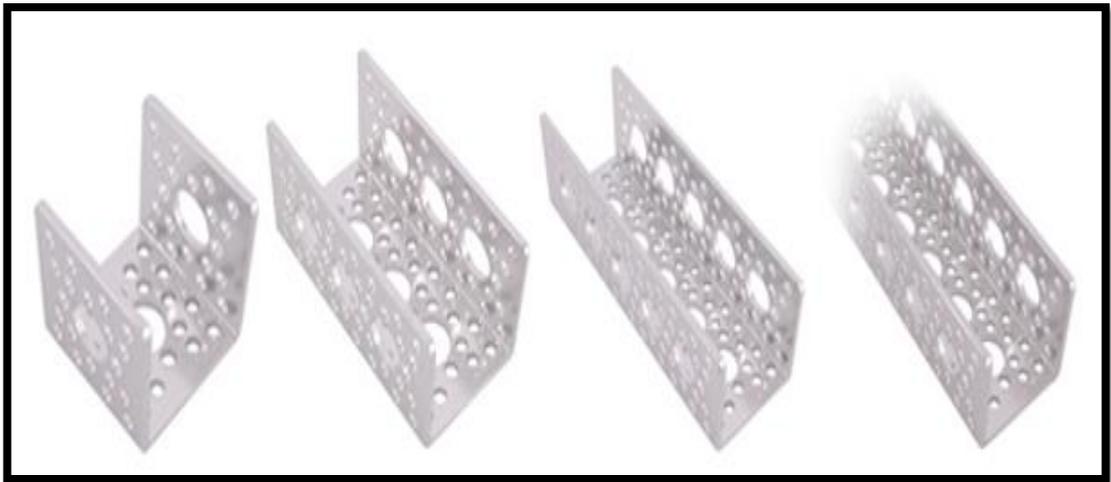


Figura 29 Aluminum Channel

Tabla 3  
Especificaciones aluminum channel

Fabricante	Actobotics			
Material	7075 aluminio			
Modelo	585440	585442	585444	585450
Largo	3.81 cm	7.62 cm	11.43 cm	22.86 cm
Ancho	3.81 cm	3.81 cm	3.81 cm	3.81 cm
Altura	3.81 cm	3.81 cm	3.81 cm	3.81 cm
Espesor	2.29 mm	2.29 mm	2.29 mm	2.29 mm
Peso	18.14 gr	31.75 gr	49.89 gr	95.25 gr

### 3.3.1.4 Hub Spacer

Es un accesorio estándar que permitirá dar un espacio entre channel y channel además de permitirnos soportar una considerable carga.



**Figura 30 Hub spacer**

**Tabla 4**  
**Especificaciones hub spacer**

Fabricante	Actobotics
Material	7075 aluminio
Modelo	585384
Diámetro	2.54 cm
Espesor	1.27 cm
Peso	10.2 gr

### 3.3.1.5 Servo Gearbox Ensamble

Es un ensamble a partir de un servo HS-5685HB mediante la incorporación de soportes laterales roscados que se puede conectar fácilmente a los channel.



**Figura 31 Servo gearbox ensamble**

El eje final de acero inoxidable con rodamientos de bolas de precisión doble permite un funcionamiento extremadamente suave, pero también pueden soportar hasta 90 kg de carga radial. Se cuenta con un potenciómetro de precisión que se une al eje de salida final para proporcionar una retroalimentación precisa. Cada ensamble está dispuesto por un mecanismo rueda-piñón con tres relaciones de transmisión diferentes (2 a 1, 3 a 1 y 3.8 a 1) que son las necesarias para el proyecto.

**Tabla 5**  
**Especificaciones servo gearbox ensamble**

Fabricante	Actobotics
Material	6061-T6 aluminio
Modelo	SPG5685A-CM 360
Peso	144.58 gr

### 3.3.1.6 Standard ServoBlocks

Es un ensamble a partir de un servo HS-5495BH, su exoesqueleto permite aumentar las capacidades de carga radial de un servo mediante el uso de rodamientos de bolas. Ayudando también a ensamblarse con facilidad a otras piezas.



**Figura 32 Standard ServoBlocks**

**Tabla 6**  
**Especificaciones standard ServoBlocks**

Fabricante	Actobotics
Material	6061-T6 aluminio
Modelo	637110
Peso	81.35 gr

### 3.3.2 Efector Final

Es una pinza paralela de tamaño estándar según el fabricante. Este kit es un equipo sencillo, duradero y versátil, las pinzas se mueven una hacia la otra en un movimiento paralelo, de ahí el nombre. Puede conectar fácilmente a casi cualquier componente Actobotics mediante su patrón de agujeros además de estar diseñado para ser usado con cualquier servo Hitec tamaño estándar.



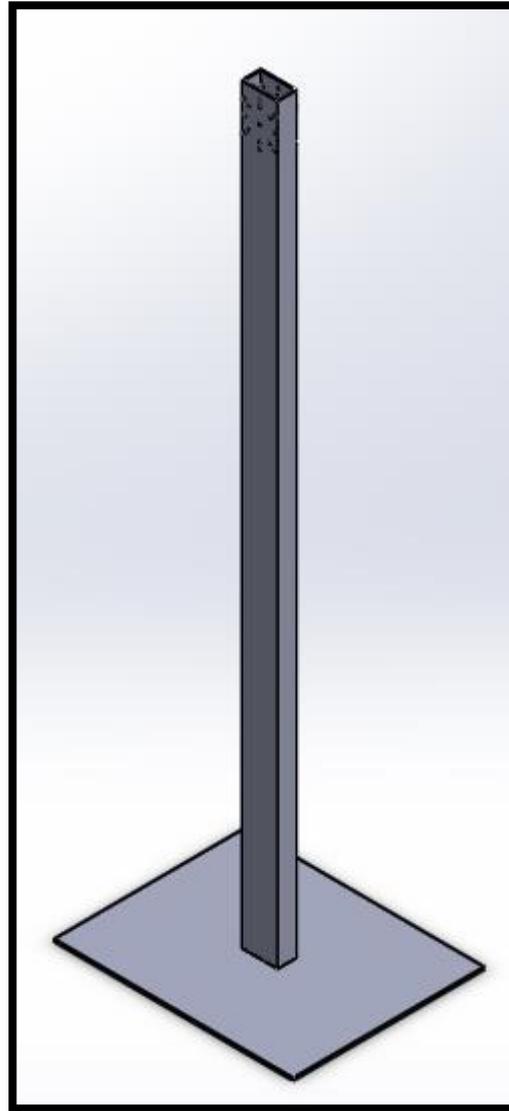
**Figura 33 Pinza paralela**

**Tabla 7**  
**Especificaciones de la pinza paralela**

Fabricante	Actobotics
Material	ABS
Modelo	637092
Anchura máxima	7.11 cm
Peso	103.95 gr

### 3.3.3 Base del robot

Para que el brazo robótico realice sin complicaciones sus movimientos en el espacio, se ha diseñado una base o estructura soporte, la cual permitirá cumplir con la disposición de movimiento requerida.(Figura 34)



**Figura 34 Base del robot**

Se consideró utilizar un perfil rectangular liso de aluminio 6061-T6 con un largo de 1.55 m para que estuviera a una altura aproximada del hombro de persona de 1,70 m de estatura.

**Tabla 8**  
**Especificaciones del perfil rectangular**

<b>Material</b>	<b>6061-T6</b>
<b>Modelo</b>	Perfil rectangular
<b>Largo</b>	1.55 m
<b>Dimensiones</b>	75x40x2 mm

Este perfil estará soldado a una placa de aluminio; reforzado y unido con una plancha de madera triplex de 5 mm mediante tornillos para madera, con las mismas dimensiones de la placa de aluminio con el fin de dar mayor estabilidad a la estructura.

**Tabla 9**  
**Especificaciones de la plancha de aluminio**

<b>Material</b>	<b>6061-T6</b>
<b>Modelo</b>	Rectangular
<b>Dimensiones</b>	500x400x2 mm

También se consideró utilizar ángulos de 90° para estabilizar el perfil con la plancha de aluminio para aumentar la rigidez de la estructura. Además el perfil permitirá introducir todo el cableado del robot por dentro del mismo para mejorar la presentación del mismo.

### **3.4 ANÁLISIS ESTÁTICO**

Para verificación estructural de las piezas componentes del manipulador robótico se ha realizado un análisis estático utilizando un herramienta CAE para simulación, en este complemento se utiliza para realizar simulaciones de piezas y conjuntos sometidos a esfuerzos mecánicos para la correcta verificación de su diseño.

El software utiliza el método de formulación de desplazamientos de elementos finitos para calcular desplazamientos, deformaciones y tensiones de los componentes con cargas internas y externas.

El análisis de elementos finitos FEA es una técnica de simulación por computadora muy influyente en el proceso de diseño y ha sido herramienta

fundamental para realizar verificaciones estructurales de diseño del sistema mecánico del manipulador robótico. Los resultados más importantes del FEA se describirán a continuación en los siguientes apartados.

Todos los análisis realizados han incluido la carga producida por el peso de cada elemento consecuencia de la fuerza de gravedad, esta fuerza se agrega al software como unos de los parámetros a ser configurados. Adicionalmente se ha agregado la carga máxima del manipulador robótico que es de 200 gramos. Esta se define como una fuerza externa ubicada en todos los casos en el extremo del brazo, con dirección hacia piso.

Entre los resultados más importantes del análisis estático que se obtiene del software de simulación está el análisis de tensiones el cual ocupa el criterio de Von Mises para su cálculo, a pesar de poder observar en el grafico el trazado de tensiones diferenciado por colores, resulta más importante y conveniente observar directamente el resultado del factor de seguridad, el cual automáticamente compara los esfuerzos obtenidos en cada nodo con el límite elástico del material configurado previamente.

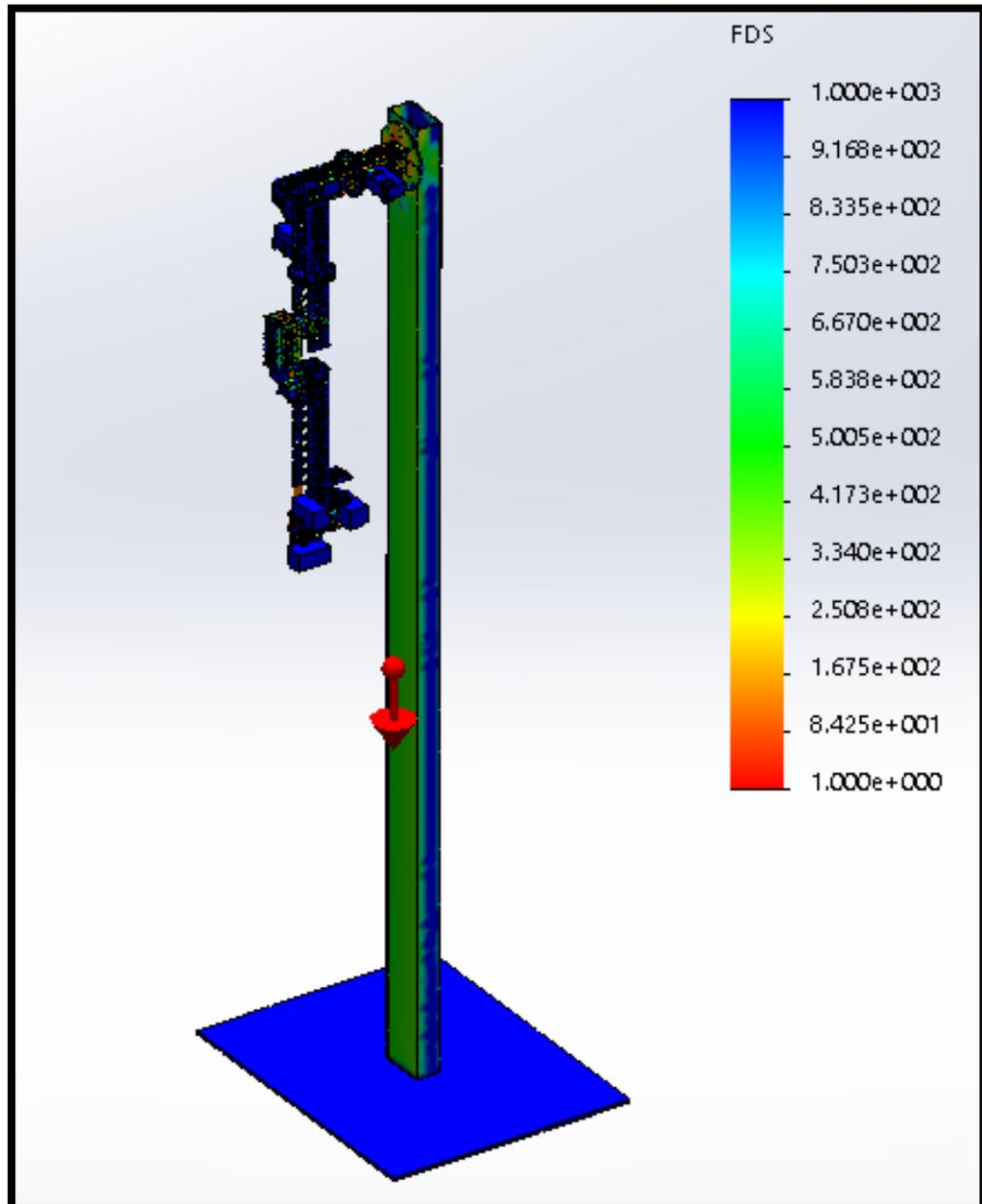
En este caso el material que predomina en los componentes mecánicos es el Aluminio 6061-T6 el cual se encuentra en la librería de materiales y tiene un límite de tracción de 310 MPa y un límite elástico de 275 MPa

#### **3.4.1 Análisis cuerpo rígido general**

Se comienza por analizar todo el conjunto ensamble ingresando la definición de interacción de componentes como si fuera un solo cuerpo rígido y no un ensamble de componentes, de esta manera se logra obtener un análisis preliminar inicial.

El software tratará a todos los componentes como si estuvieran fusionados entre sí en todas las caras que están en contacto directo. Esta es una interacción entre componentes aproximada la cual sirve únicamente para ubicar posibles puntos o zonas en donde se concentren los mayores

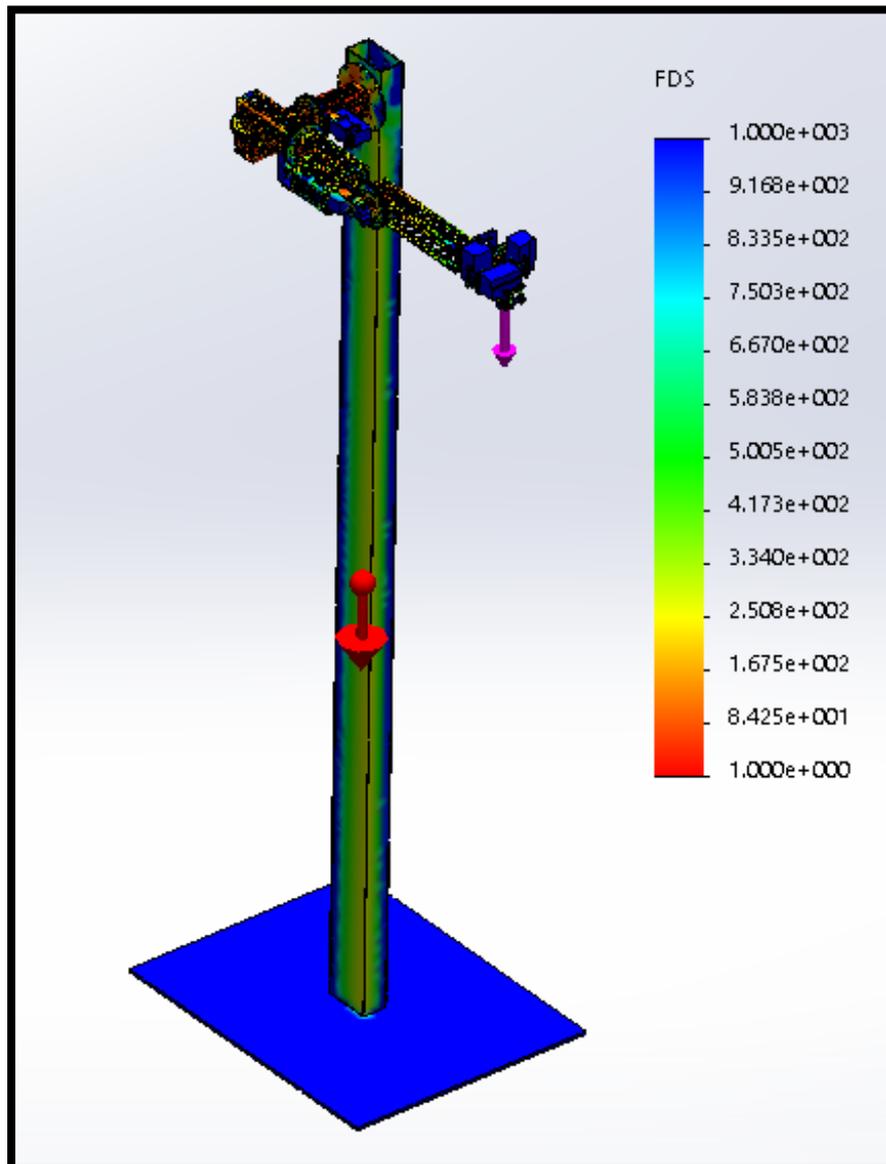
esfuerzos mecánicos para que una vez identificados se los pueda analizar posteriormente. El resultado del análisis del factor de seguridad se puede observar a continuación en la Figura 35.



**Figura 35 Análisis cuerpo rígido preliminar**

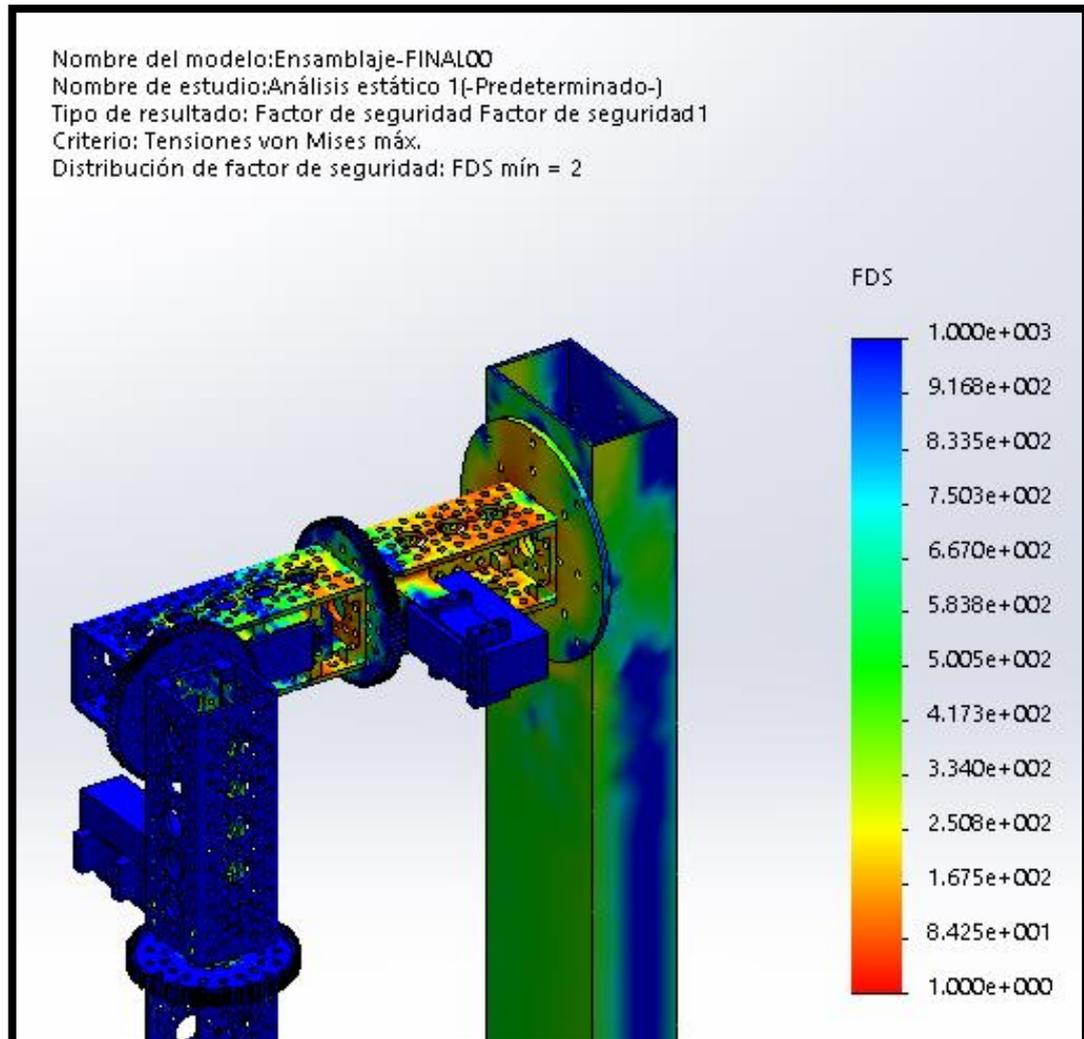
De la figura observada previamente se nota que la zona donde se produce la mayor cantidad de esfuerzo se encuentra en la parte del hombro.

Adicionalmente se realizó el mismo análisis pero en la orientación del brazo cuando se flexiona 90 grados verticalmente, observando así que se produce similares resultados como se observa en la Figura 36. Esto sumado a la percepción de diseño ayuda a concluir que la zona del hombro es la zona de mayor interés la cual se debe tomar como referencia para los siguientes análisis estáticos posteriores.



**Figura 36 Análisis cuerpo rígido flexión hombro**

A continuación se puede observar en la Figura 37 la zona del hombro, zona de mayor importancia, la cual es donde se encuentran los mayores esfuerzos mecánicos a ser analizados posteriormente.



**Figura 37 Análisis estático zona de importancia**

De la figura se destacan los colores cercanos al rojo, este color representa en la escala un factor de seguridad de 1 el mínimo factor de seguridad a ser tomado en cuenta, mientras que el color azul representa un factor de seguridad de 1000, el cual representa zonas en donde las tensiones mecánicas son bajas en comparación con las zonas de colores rojizos.

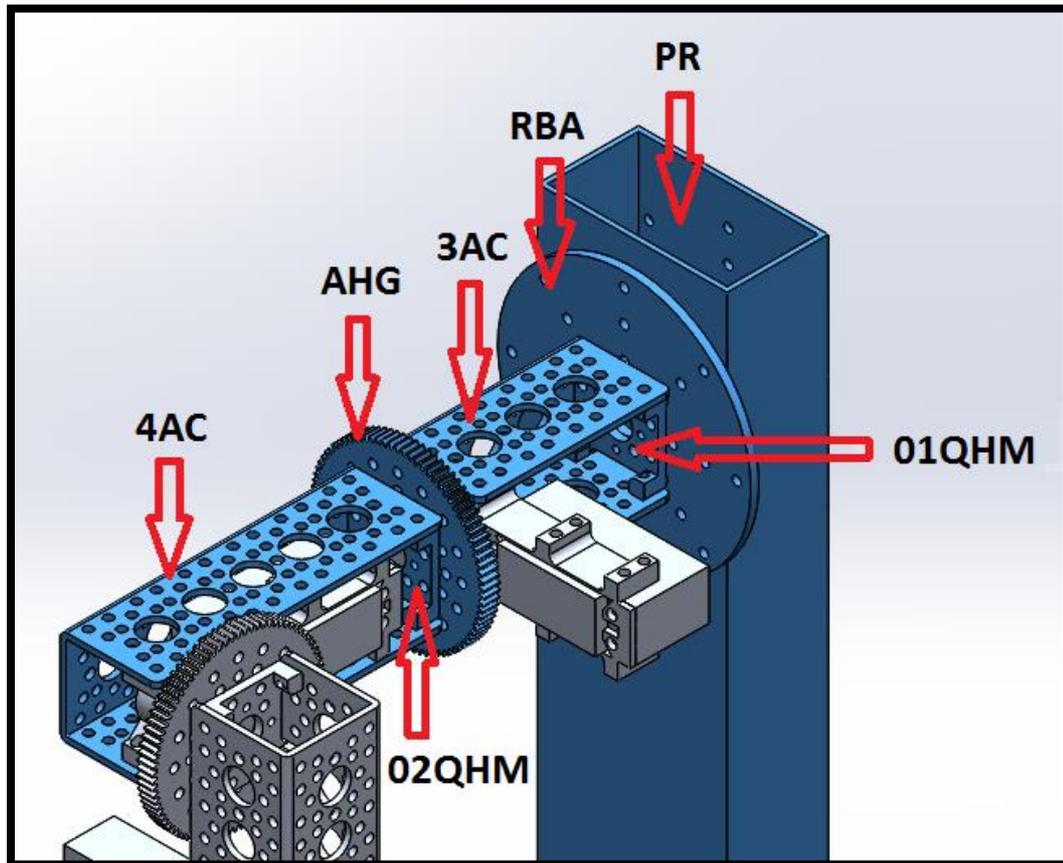
Esta zona del hombro es donde se acumulan las mayores tensiones mecánicas producidas como consecuencia del peso de las piezas componentes del manipulador robótico.

Del análisis preliminar del hombro se puede concluir que se necesita un análisis más profundo de las uniones entre componentes entre las siguientes piezas:

- **Análisis estático 1:** Perfil rectangular y pieza Round base A,
- **Análisis estático 2:** Round base A y pieza 01-90° Quad Hub Mount C.
- **Análisis estático 3:** 01-90° Quad Hub Mount C y pieza 3.00 pulg Aluminum Channel.
- **Análisis estático 4:** Pieza 32P Aluminum Hub Gears y pieza 02-90° Quad Hub Mount C.
- **Análisis estático 5:** 02-90° Quad Hub Mount C y pieza 4.50 pulg Aluminum Channel.

Estas uniones se han escogido porque el tipo de simulación de cuerpo rígido realizado no toma en cuenta la unión de piezas mediante pernos, las cuales se debe verificar que cumplan un factor de seguridad de diseño aceptable. Se puede observar en la Figura 38 las piezas involucradas en su ubicación dentro del ensamble en la zona del hombro de acuerdo a la siguiente denominación:

- **PR:** Perfil rectangular.
- **RBA:** Round base A.
- **01QHM:** 01-90° Quad Hub Mount C.
- **02QHM:** 02-90° Quad Hub Mount C.
- **3AC:** 3.00 pulg Aluminum Channel.
- **4AC:** 4.50 pulg Aluminum Channel.
- **AHG:** 32P Aluminum Hub Gears



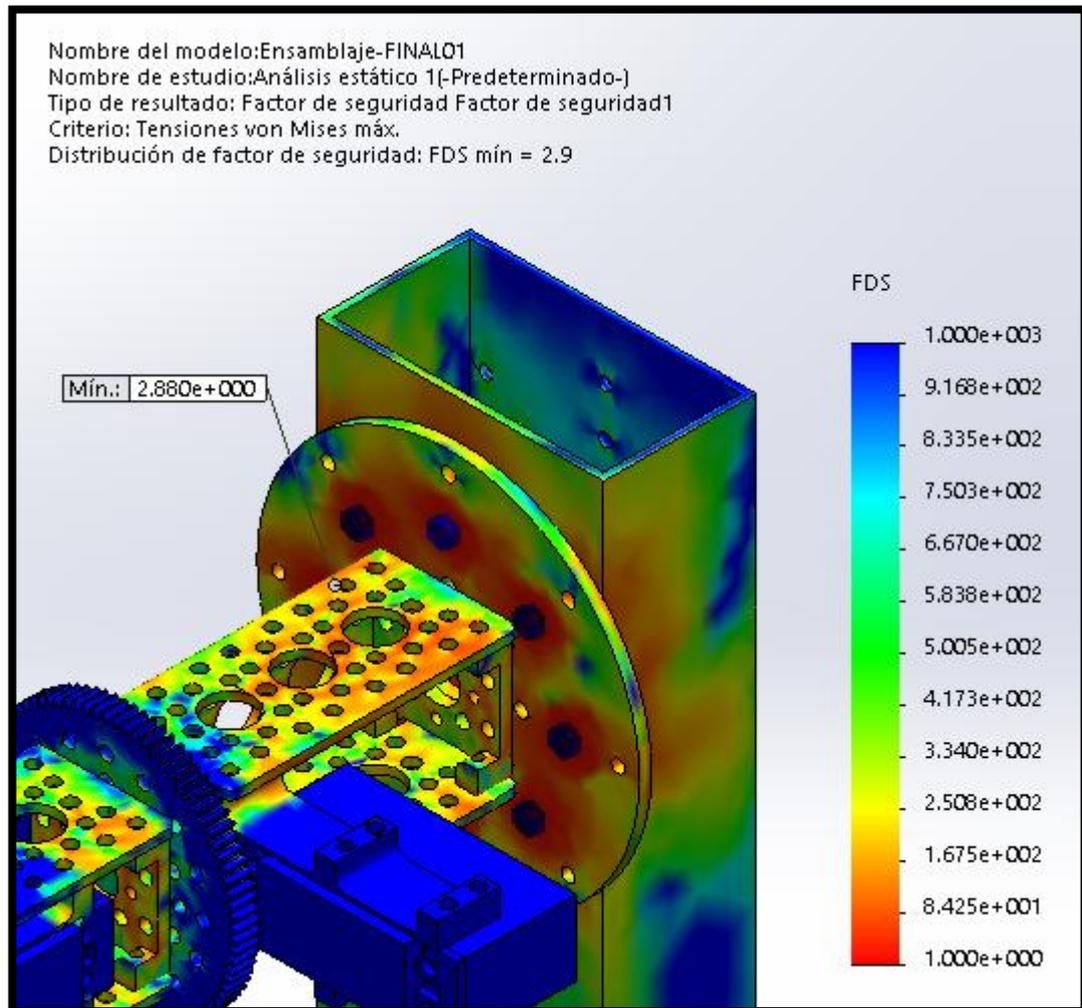
**Figura 38 Piezas zona de importancia**

Adicional a esto se descarta de los análisis posteriores el análisis del ensamblaje de Servo Gearbox el cual según datos del fabricante cuenta con un eje de acero inoxidable de 1/2 pulgada que está soportado mediante cojinete de bolas de doble hilera que puede soportar una carga radial aproximada de 200 lb (90 kg). Por tal motivo se puede concluir que existen zonas del hombro de mayor riesgo en comparación con el ensamblaje Servo Gearbox como las escogidas para los análisis posteriores.

### **3.4.2 Análisis estático 1**

Este análisis se realiza simplificando la interacción de componentes con dos tipos de contacto, de esta manera existirán 2 cuerpos rígidos que serán unidos mediante un tipo de conexión de pernos entre los componentes

PR y RBA. Los resultados de este análisis de muestra a continuación en la Figura 39



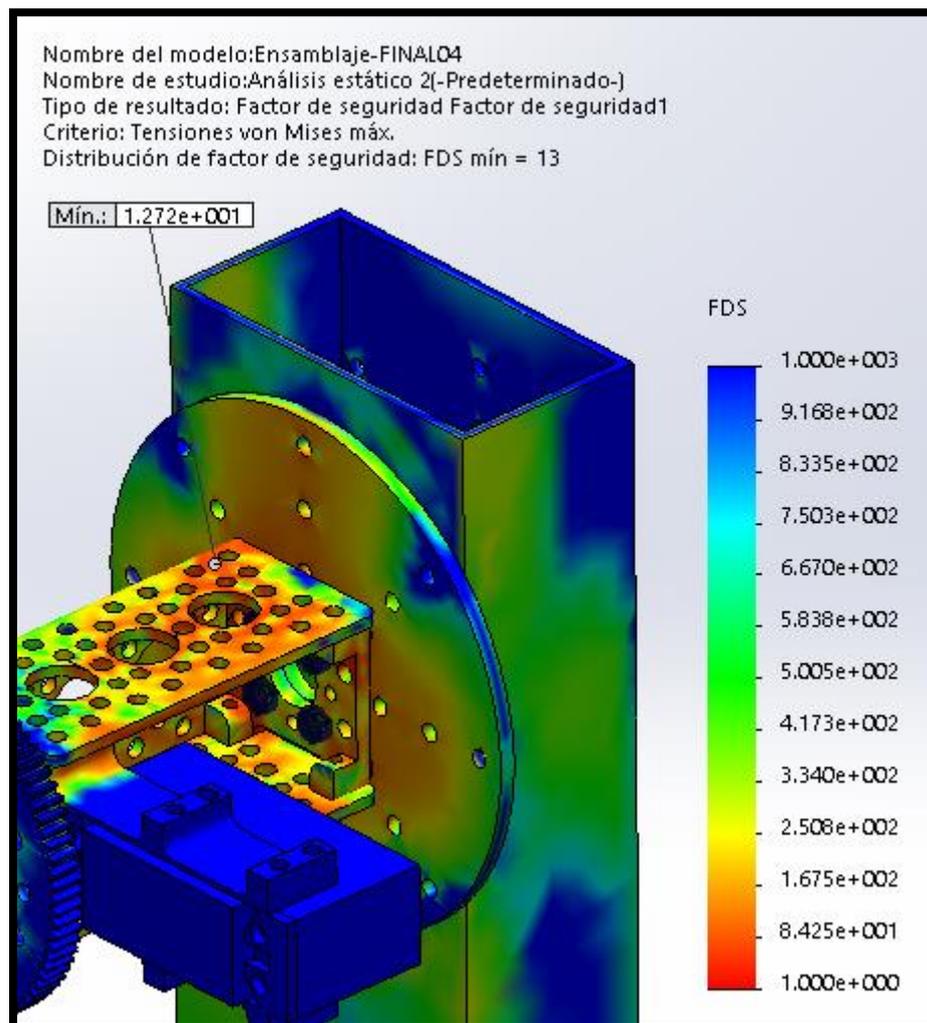
**Figura 39 Análisis estático 1**

La conexión está realizada mediante 8 pernos 6-32 UNC de acero aleado que se encuentra en la biblioteca de materiales con un límite de tracción de 724 MPa y un límite elástico de 620 MPa.

Se señala el nodo sometido a mayor esfuerzo con el factor de seguridad mínimo de toda la simulación, que es de 2.88, el cual es un valor aceptable y suficiente para la aplicación.

### 3.4.3 Análisis estático 2

Este análisis se realiza simplificando la interacción de componentes con dos tipos de contacto, de esta manera existirán 2 cuerpos rígidos que serán unidos mediante un tipo de conexión de pernos entre los componentes RBA y 01QHM. Los resultados de este análisis de muestra a continuación en la Figura 40.



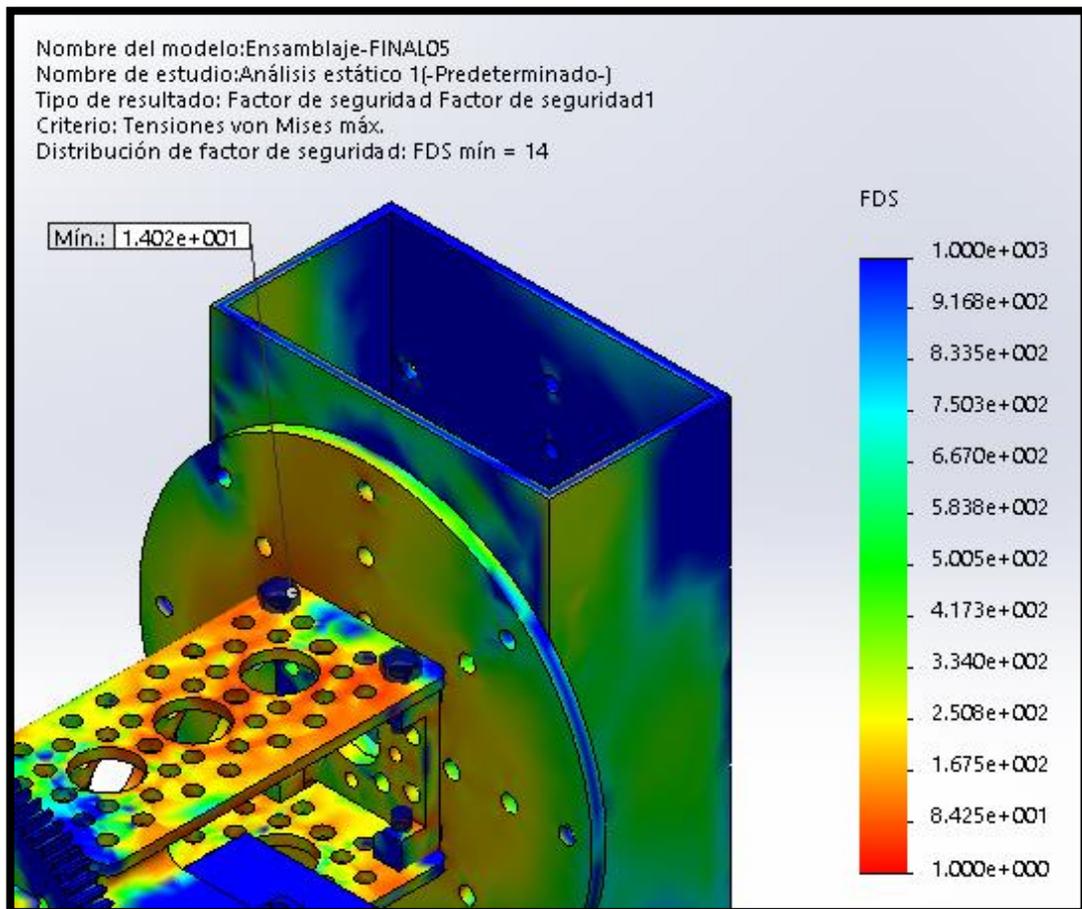
**Figura 40 Análisis estático 2**

La conexión está realizada mediante 4 pernos 6-32 UNC de acero aleado que se encuentra en la biblioteca de materiales con un límite de tracción de 724 MPa y un límite elástico de 620 MPa.

Se señala el nodo sometido a mayor esfuerzo con el factor de seguridad mínimo de toda la simulación, que es de 12.72, el cual es un valor considerablemente mayor al obtenido en el análisis estático 1 de 2.88.

### 3.4.4 Análisis estático 3

Este análisis se realiza simplificando la interacción de componentes con dos tipos de contacto, de esta manera existirán 2 cuerpos rígidos que serán unidos mediante un tipo de conexión de pernos entre los componentes 01QHM y 3AC. Los resultados de este análisis de muestra a continuación en la Figura 41.



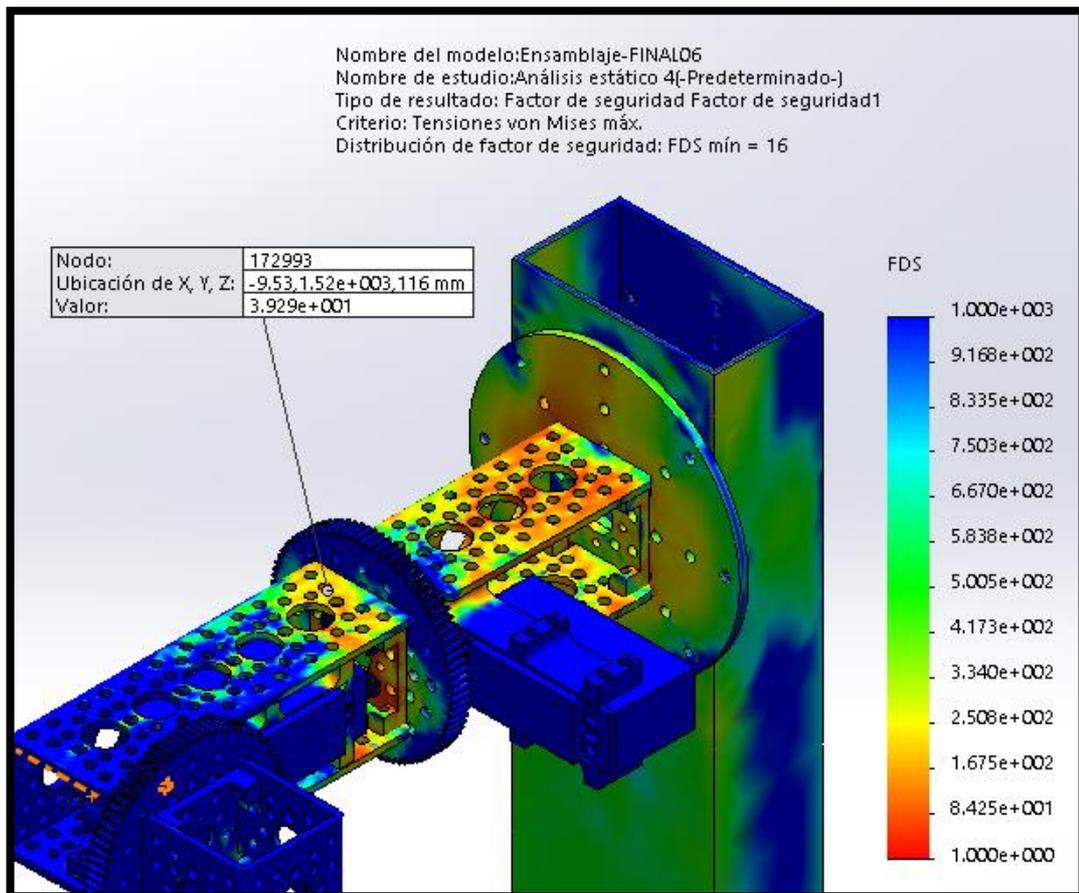
**Figura 41 Análisis estático 3**

La conexión está realizada mediante 4 pernos 6-32 UNC de acero aleado que se encuentra en la biblioteca de materiales con un límite de tracción de 724 MPa y un límite elástico de 620 MPa.

Se señala el nodo sometido a mayor esfuerzo con el factor de seguridad mínimo de toda la simulación, que es de 14.02, el cual es un valor aceptable pero más que suficiente para la aplicación.

### 3.4.5 Análisis estático 4

Este análisis se realiza simplificando la interacción de componentes con dos tipos de contacto, de esta manera existirán 2 cuerpos rígidos que serán unidos mediante un tipo de conexión de pernos entre los componentes AHG y 02QHM. Los resultados de este análisis de muestra a continuación en la Figura 42.



**Figura 42 Análisis estático 4**

La conexión está realizada mediante 4 pernos 6-32 UNC de acero aleado que se encuentra en la biblioteca de materiales con un límite de tracción de 724 MPa y un límite elástico de 620 MPa.

Se señala el nodo sometido a mayor esfuerzo con el factor de seguridad mínimo de toda la simulación, que es de 39.29, el cual es un valor aceptable aunque cabe destacar que es un valor mucho mayor al encontrado en el análisis estático 3 de 14.02.

### 3.4.6 Análisis estático 5

Este análisis se realiza simplificando la interacción de componentes con dos tipos de contacto, de esta manera existirán 2 cuerpos rígidos que serán unidos mediante un tipo de conexión de pernos entre los componentes 02QHM y 4AC. Los resultados de este análisis de muestra a continuación en la Figura 43.

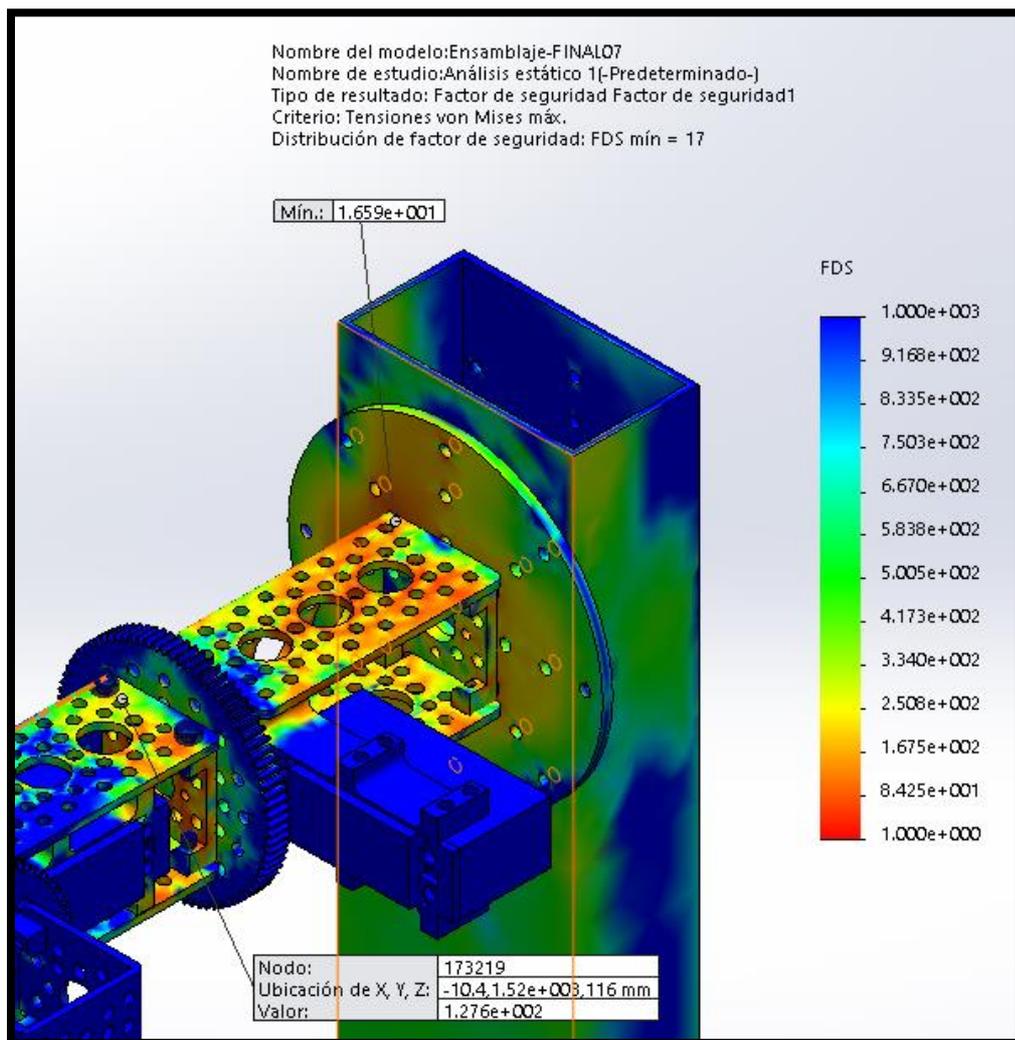


Figura 43 Análisis estático 5

La conexión está realizada mediante 4 pernos 6-32 UNC de acero aleado que se encuentra en la biblioteca de materiales con un límite de tracción de 724 MPa y un límite elástico de 620 MPa.

Se señala el nodo sometido a mayor esfuerzo con el factor de seguridad mínimo de toda la simulación, que es de 16.59, pero en realidad el valor menor en la zona de interés de la conexión mediante pernos es de 127. Este valor es mucho mayor al obtenido en todos los análisis estáticos previos.

### 3.4.7 Análisis de factor de seguridad

Según los análisis estáticos realizados en los apartados anteriores se puede crear la Tabla 10, la cual resume todos los factores de seguridad obtenidos en la zona de interés analizada.

**Tabla 10**  
**Resumen análisis estático**

Análisis estático	Factor de seguridad
1	2.88
2	12.72
3	14.02
4	39.29
5	127

Luego de analizar estos resultados, podemos concluir que el factor de seguridad se incrementa gradualmente conforme se analizan los nodos más lejanos desde origen del hombro hacia su extremo. Esto es consistente con lo que se esperaría observar antes de realizar el análisis, ya que la zona de unión entre la pieza round base A y el perfil rectangular está sometida al mayor esfuerzo de flexión debido al peso del brazo robótico.

Debido a la variedad de factores de seguridad que se han obtenido se debe destacar el valor más importante, el valor de 2.88 es el que define el factor de seguridad general del sistema mecánico por ser el de menor valor, lo que quiere decir que en el caso de una sobrecarga, se provocará probablemente una falla en esa zona primero, antes de en cualquier otro lugar.

### **3.5 ANÁLISIS CINEMÁTICO Y DINÁMICO**

Los resultados que se van a obtener se pueden dividir en dos grupos. Por un lado la obtención de la posición, velocidad y aceleración (cinemática), y por otro lado la obtención de las reacciones (dinámica). Estos estudios se realizarán para cada una de las partes del robot que sean de mayor interés.

Los resultados de este análisis servirán para dos etapas importantes; diseño y selección de elementos mecánicos y en el dimensionamiento y selección de actuadores. Siendo para éste último muy importante los resultados obtenidos de torque en cada una de las articulaciones.

Para este análisis se ha elegido utilizar el complemento Matlab, debido a la capacidad de modelamiento y simulación de sistemas mecánicos, por éste motivo es muy utilizado en aplicaciones robóticas. En este complemento se puede obtener todos los datos necesarios mencionados anteriormente producto de un análisis cinemático y dinámico. Además este complemento tiene la capacidad de importar modelos CAD diseñados en cualquier otro software.

#### **3.5.1 Modelamiento en Matlab**

Se procederá a exportar el modelo CAD previamente realizado en el software, el cual se ha simplificado de manera que ayude al desempeño de la simulación en el complemento de Matlab.

Este proceso consta de dos etapas; la primera es exportar el Ensamblaje en el software CAD a formato XML y la segunda es importar el archivo XML usando el complemento de Matlab. Luego este archivo XML se convierte en un archivo SLX el cual es la extensión de los archivos utilizados en Matlab.

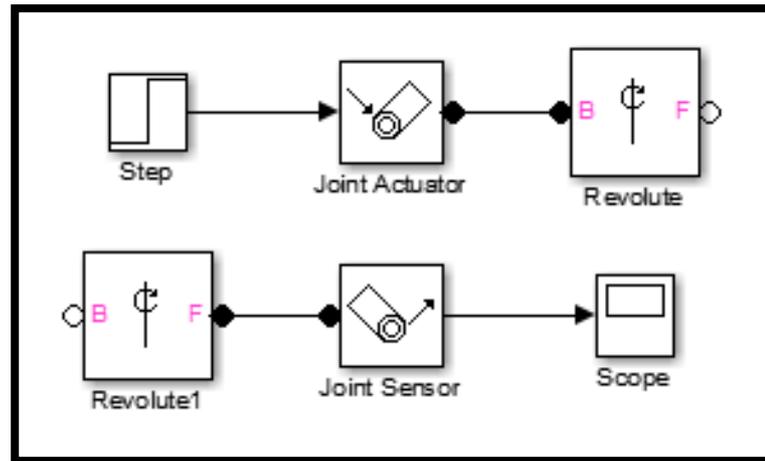
Los bloques de Matlab normalmente definen una función de transferencia para aplicaciones como diseño de sistemas de control y procesamiento de señal, este enfoque ayudar a realizar el análisis del modelo.

Al realizar un modelo de las interacciones entre componentes en sistemas mecánicos, se requiere un estudio amplio, por lo que con el complemento de Matlab se logra simplificar este proceso mediante la creación de un sistema de control como un diagrama de bloques de circulación de señal unidireccional y luego comunicar a este modelo a una planta física.

El primero de tipo “Body” que representa una pieza sólida con sus propiedades de masa e inercia bien definidas, que el software de simulación utilizará para el análisis cinemático y dinámico. El segundo que es del tipo “Revolute”, equivalente en software CAD como una relación de posición “concéntrica”, representa un GDL de tipo revoluta que cuenta con I/O para añadir bloques de sensores y actuadores según sea necesario en la simulación.

Se han identificado los siete bloques tipo revoluta, que concuerdan con las articulaciones que generan el movimiento en el robot, las cuales representan los siete GDL del brazo robótico.

Cabe destacar que el modelamiento en diagramas de bloques funcionan únicamente en el ambiente de simulación del complemento de Matlab, por lo que para poder interactuar con los bloques comunes, se debe ocupar dos bloques que se describen a continuación y se ilustran en la Figura 44: el “Joint Actuator” representa la transformación de una señal unidireccional de Matlab, esta señal se puede producir de cualquier bloque generador de señal de Matlab como por ejemplo un “Step” o un “Ramp”. Esta señal de entrada servirá para controlar un bloque revoluta del complemento de Matlab que representa una articulación del robot.

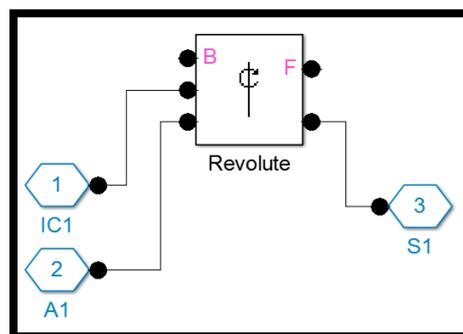


**Figura 44 Uso de bloques: Joint Actuator y Joint Sensor**

El “Joint Sensor” actúa de manera similar al “Joint Actuator” pero de manera inversa ya que éste genera una señal de salida que se puede visualizar de forma usual en el ambiente de Matlab mediante bloques de visualización como por ejemplo el “Scope”.

Los puntos de conexión en estos bloques simbolizan el tipo de señal.

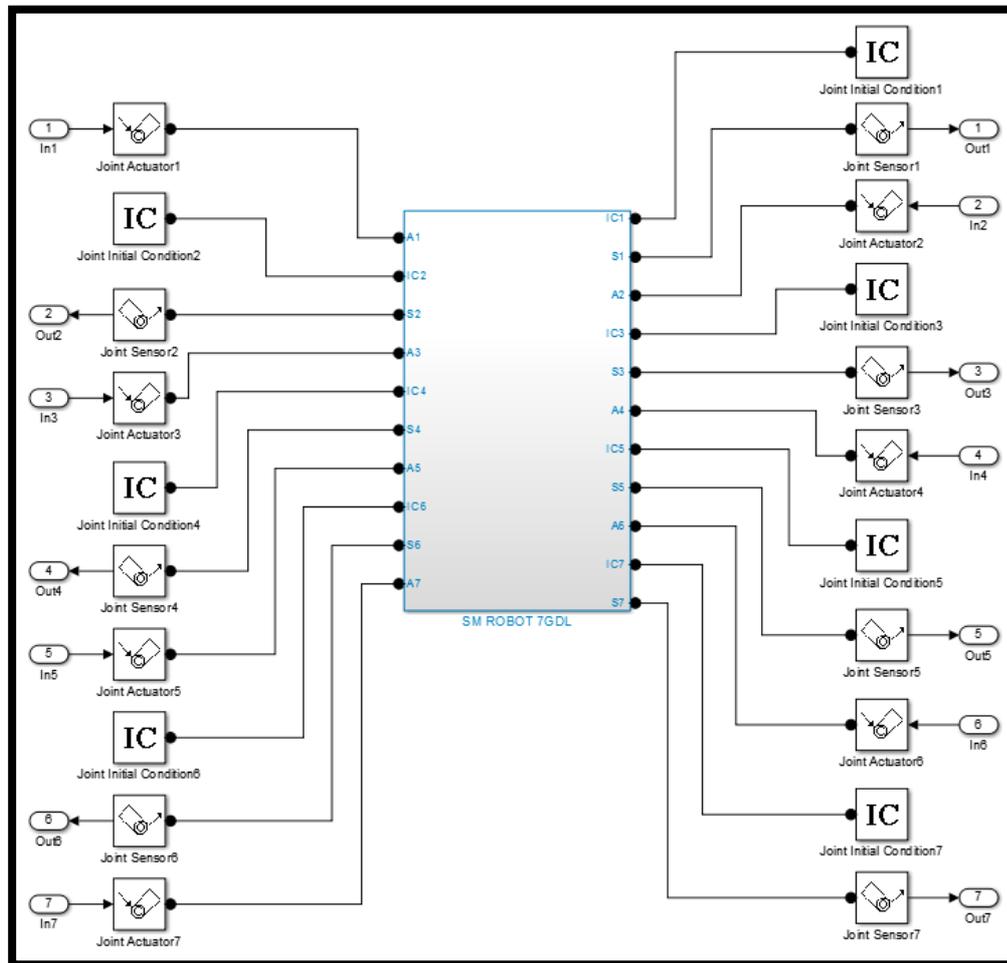
En el modelamiento en diagramas de bloques se ha procedido a ordenar las diferentes partes del diagrama con la ayuda de un bloque de Matlab llamado “Subsystem” por lo que se ha incluido puntos de conexión (Figura 45) entre los elementos del subsistema y los elementos exteriores.



**Figura 45 Puntos de conexión de subsistema**

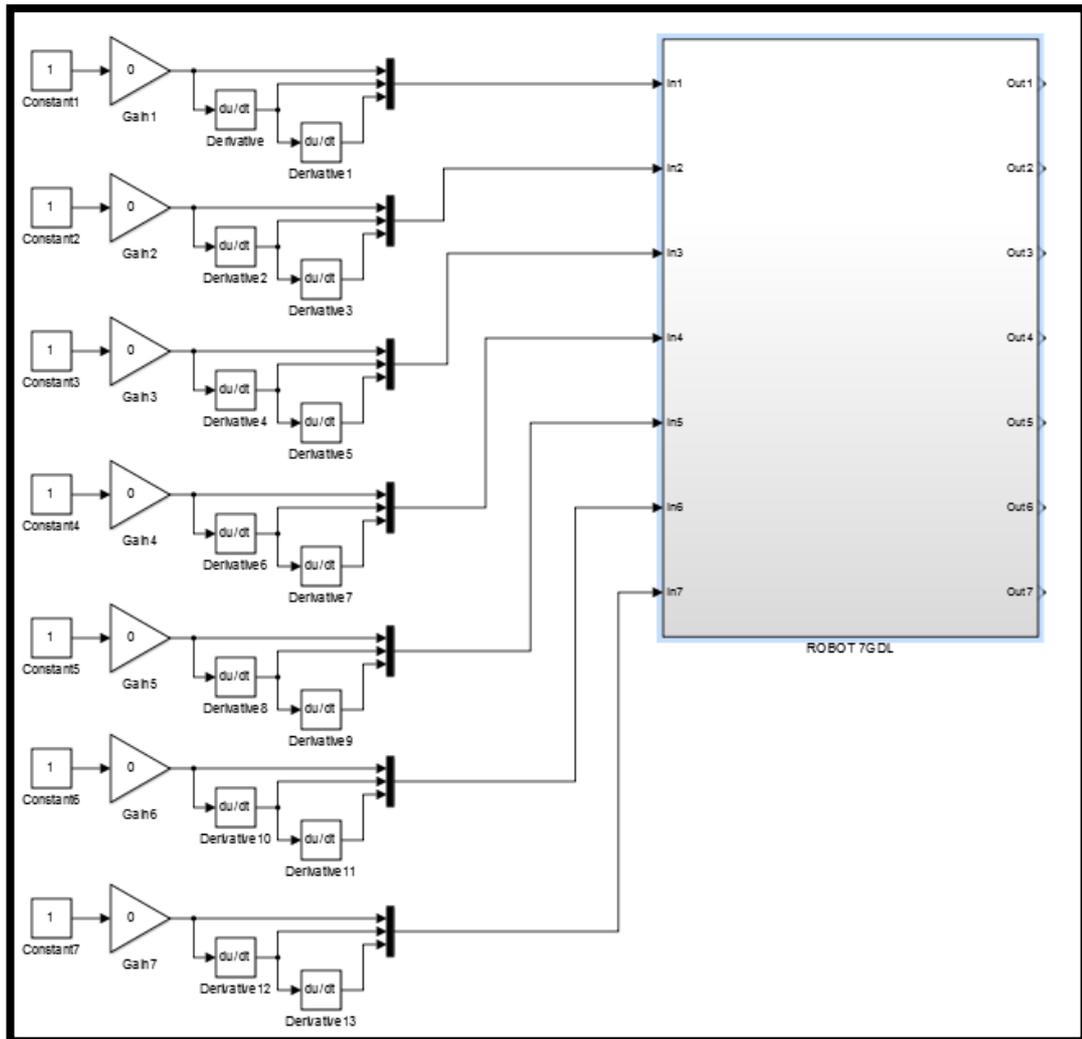
Por motivo de organización se ubicó afuera del subsistema los bloques “Joint Sensor” y “Joint Actuator”, como se indica en la Figura 46. De igual

manera lo contenido en esta figura se encuentra contenido en otro subsistema llamado “ROBOT 7 GDL”.



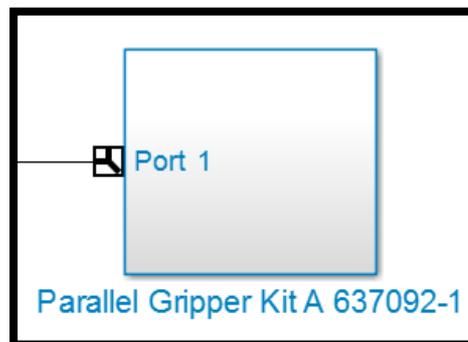
**Figura 46 Subsistema SM ROBOT 7GDL**

Los bloques que se conectan al subsistema ROBOT 7GDL son bloques de uso común como por ejemplo: “Gain”, “Constant”, etc. Estos bloques generan la señal necesaria para controlar las articulaciones en la simulación. (Figura 47)



**Figura 47 Subsistema ROBOT 7GDL**

También se ha organizado los diagramas de bloques del Parallel Gripper en otro subsistema como se indica en la Figura 48.



**Figura 48 Subsistema Parallel Gripper**

Dentro de este subsistema Parallel Gripper se puede encontrar; elementos como por ejemplo: “Body”, “Revolute”, etc. y “Gain”, “Constant”, etc.

### **3.5.2 Análisis cinemático**

En este apartado se realizará el análisis cinemático del brazo robótico, donde consta la resolución del problema cinemático inverso.

Normalmente el objetivo de la cinemática inversa es encontrar los valores que deben tomar las coordenadas articulares del robot para que su efector final se posicione y oriente según un requerimiento determinado. El cálculo de la cinemática inversa es un problema complejo que consiste en la resolución de una serie de ecuaciones cuya solución normalmente no es única.

Para este proyecto se requiere orientar los eslabones del robot de manera similar a la que se encuentran los miembros del brazo humano, por lo que la resolución tradicional de la cinemática inversa en donde existen múltiples soluciones, no cumpliría el requerimiento principal del proyecto.

El posicionamiento en telerobótica se realiza normalmente de forma manual por parte del operador quien observa la posición constantemente y corrige los movimientos de acuerdo a su necesidad.

Para cumplir el objetivo del proyecto, se requiere controlar la orientación de cada eslabón, dejando de lado su posicionamiento exacto. Esto da como resultado una única solución de los valores de las coordenadas articulares.

El sistema de captura de movimiento proporciona los datos de orientación de las partes del brazo que son el requerimiento a cumplir en la resolución de la cinemática inversa.

### 3.5.2.1 Cinemática Inversa

En la Figura 49 se muestra el modelo equivalente de la configuración cinemática del robot, el cual servirá para plantear las ecuaciones necesarias en la resolución del problema cinemático inverso.

Para resolver el problema de la cinemática inversa se han definido las siguientes variables:

$q_1, q_2, q_3, q_4, q_5, q_6$  y  $q_7$  son las coordenadas articulares

$a, b, c, d, e, f, g, h, i$  son variables de la matriz de orientación del IMU1

$aa, bb, cc, dd, ee, ff, gg, hh, ii$  son variables de la matriz de orientación del IMU2

$aaa, bbb, ccc, ddd, eee, fff, ggg, hhh, iii$  son variables de la matriz de orientación del IMU3

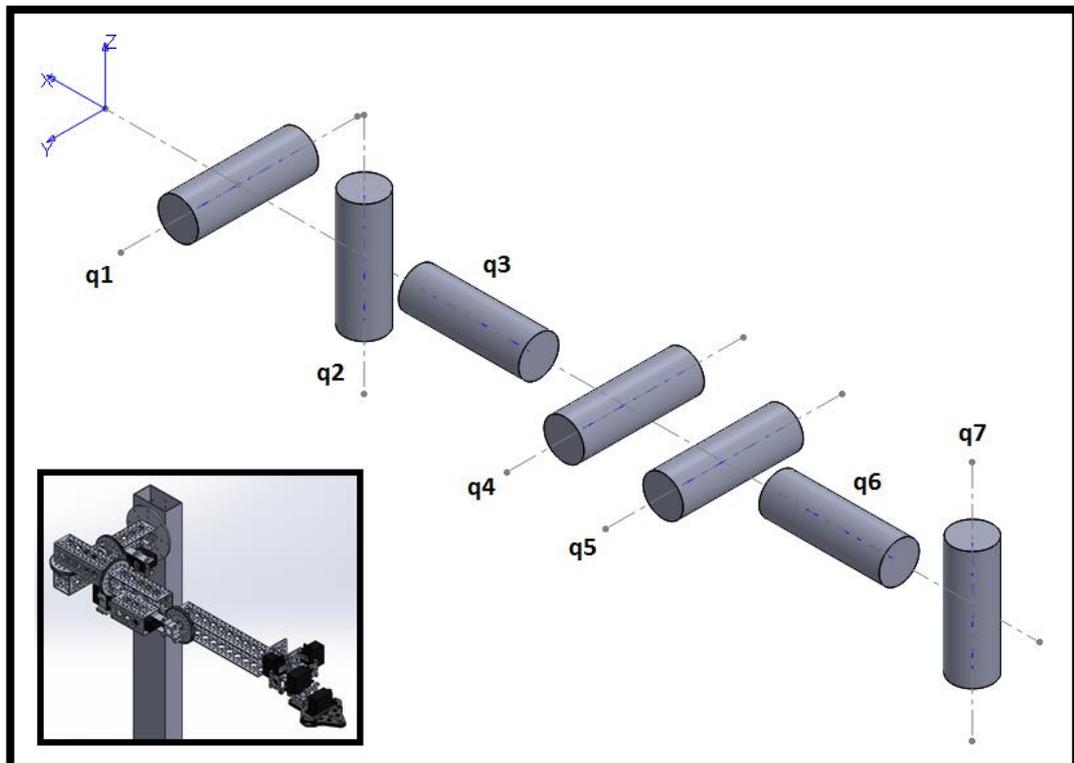


Figura 49 Sistema de referencia

La matriz de rotación para q1 es igual:

$${}^0A_1 = \begin{bmatrix} \cos(q1) & 0 & \sin(q1) \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin(q1) & 0 & \cos(q1) \end{bmatrix}$$

La matriz de rotación para q2 es igual:

$${}^1A_2 = \begin{bmatrix} \cos(q2) & -\sin(q2) & 0 \\ \sin(q2) & \cos(q2) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

La matriz de rotación para q3 es igual:

$${}^2A_3 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(q3) & -\sin(q3) \\ 0 & \sin(q3) & \cos(q3) \end{bmatrix}$$

La matriz de rotación para q4 es igual:

$${}^3A_4 = \begin{bmatrix} \cos(q4) & 0 & \sin(q4) \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin(q4) & 0 & \cos(q4) \end{bmatrix}$$

La matriz de rotación para q5 es igual:

$${}^4A_5 = \begin{bmatrix} \cos(q5) & 0 & \sin(q5) \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin(q5) & 0 & \cos(q5) \end{bmatrix}$$

La matriz de rotación para q6 es igual:

$${}^5A_6 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(q6) & -\sin(q6) \\ 0 & \sin(q6) & \cos(q6) \end{bmatrix}$$

La matriz de rotación para q7 es igual:

$${}^6A_7 = \begin{bmatrix} \cos(q7) & -\sin(q7) & 0 \\ \sin(q7) & \cos(q7) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Las matrices de orientación de cada IMU se definen de la siguiente manera:

Matriz de orientación IMU1

$$IMU1 = \begin{bmatrix} a & b & c \\ d & e & f \\ g & h & i \end{bmatrix}$$

Matriz de orientación IMU2

$$IMU2 = \begin{bmatrix} aa & bb & cc \\ dd & ee & ff \\ gg & hh & ii \end{bmatrix}$$

Matriz de orientación IMU3

$$IMU3 = \begin{bmatrix} aaa & bbb & ccc \\ ddd & eee & fff \\ ggg & hhh & iii \end{bmatrix}$$

Para los valores de q1, q2 y q3 se tiene que: ambos

$$IMU1 = {}^0A_3$$

La matriz inversa de  ${}^0A_1$  es igual a:

$$({}^0A_1)^{-1} = {}^1A_0$$

$$IMU1 = {}^0A_1 \times {}^1A_2 \times {}^2A_3, \quad \text{multiplicando ambos lados por } {}^1A_0$$

$${}^1A_0 \times IMU1 = {}^1A_0 \times {}^0A_1 \times {}^1A_2 \times {}^2A_3$$

$${}^1A_0 \times IMU1 = {}^1A_2 \times {}^2A_3$$

$$ec = {}^1A_0 \times IMU1 - {}^1A_2 \times {}^2A_3 = 0$$

Remplazando y operando se tiene que:

$$ec = \begin{bmatrix} ec_{1,1} & ec_{1,2} & ec_{1,3} \\ ec_{2,1} & ec_{2,2} & ec_{2,3} \\ ec_{3,1} & ec_{3,2} & ec_{3,3} \end{bmatrix} = 0$$

$$ec_{1,1} = a * \cos(q1) - \cos(q2) - g * \sin(q1)$$

$$ec_{1,2} = \cos(q3) * \sin(q2) + b * \cos(q1) - h * \sin(q1)$$

$$ec_{1,3} = c * \cos(q1) - \sin(q2) * \sin(q3) - i * \sin(q1)$$

$$ec_{2,1} = d - \sin(q2)$$

$$ec_{2,2} = e - \cos(q2) * \cos(q3)$$

$$ec_{2,3} = f + \cos(q2) * \sin(q3)$$

$$ec_{3,1} = g * \cos(q1) + a * \sin(q1)$$

$$ec_{3,2} = h * \cos(q1) - \sin(q3) + b * \sin(q1)$$

$$ec_{3,3} = i * \cos(q1) - \cos(q3) + c * \sin(q1)$$

De  $ec_{2,1}$  se puede determinar el valor de la articulación  $q2$  igualando a cero.

$$d - \sin(q2) = 0$$

$$q2 = \text{asin}(d)$$

De  $ec_{3,1}$  se puede determinar el valor de la articulación  $q1$  igualando a cero.

$$g * \cos(q1) + a * \sin(q1) = 0$$

$$q1 = \text{atan}\left(-\frac{g}{a}\right)$$

De  $ec_{3,2}$  se puede determinar el valor de la articulación  $q_3$  reemplazando los valores de  $q_1$  e igualando a cero.

$$h * \cos(q_1) - \sin(q_3) + b * \sin(q_1) = 0$$

$$q_3 = \text{asin}(\cos(q_1) * h + b * \sin(q_1))$$

Para hallar el valor de la articulación  $q_4$  se parte de la siguiente ecuación:

$$IMU2 = {}^0A_4$$

$$IMU2 = {}^0A_1 \times {}^1A_4, \quad \text{multiplicando ambos lados por } {}^1A_0$$

$${}^1A_0 \times IMU2 = {}^1A_0 \times {}^0A_1 \times {}^1A_4$$

$${}^1A_4 = {}^1A_0 \times IMU2$$

Reemplazando y operando se tiene que:

$${}^1A_4 = \begin{bmatrix} aa * \cos(q_1) - gg * \sin(q_1) & bb * \cos(q_1) - hh * \sin(q_1) & cc * \cos(q_1) - ii * \sin(q_1) \\ dd & ee & ff \\ gg * \cos(q_1) + aa * \sin(q_1) & hh * \cos(q_1) + bb * \sin(q_1) & ii * \cos(q_1) + cc * \sin(q_1) \end{bmatrix}$$

La matriz de rotación para el IMU2 de  ${}^1A_4$  es:

$${}^1A_4 = {}^1A_2 \times {}^2A_3 \times {}^3A_4$$

Reemplazando y operando se tiene que:

$${}^1A_4 = \begin{bmatrix} {}^1A_{4,1,1} & {}^1A_{4,1,2} & {}^1A_{4,1,3} \\ {}^1A_{4,2,1} & {}^1A_{4,2,2} & {}^1A_{4,2,3} \\ {}^1A_{4,3,1} & {}^1A_{4,3,2} & {}^1A_{4,3,3} \end{bmatrix}$$

$${}^1A_{4,1,1} = \cos(q2) * \cos(q4) - \sin(q2) * \sin(q3) * \sin(q4)$$

$${}^1A_{4,1,2} = -\cos(q3) * \sin(q2)$$

$${}^1A_{4,1,3} = \cos(q2) * \sin(q4) + \cos(q4) * \sin(q2) * \sin(q3)$$

$${}^1A_{4,2,1} = \cos(q4) * \sin(q2) + \cos(q2) * \sin(q3) * \sin(q4)$$

$${}^1A_{4,2,2} = \cos(q2) * \cos(q3)$$

$${}^1A_{4,2,3} = \sin(q2) * \sin(q4) - \cos(q2) * \cos(q4) * \sin(q3)$$

$${}^1A_{4,3,1} = -\cos(q3) * \sin(q4)$$

$${}^1A_{4,3,2} = \sin(q3)$$

$${}^1A_{4,3,3} = \cos(q3) * \cos(q4)$$

Igualando el valor de  ${}^1A_{4,3,1}$  en la matriz de rotación con el valor de la multiplicación de  ${}^1A_0 \times IMU2$  se tiene que:

$${}^1A_{4,3,1} = ({}^1A_0 \times IMU2)_{3,1}$$

$$-\cos(q3) * \sin(q4) = gg * \cos(q1) + aa * \sin(q1) \quad \text{Ec. 2.3.1}$$

Igualando el valor de  ${}^1A_{4,3,3}$  en la matriz de rotación con el valor de la multiplicación de  ${}^1A_0 \times IMU2$  se tiene que:

$${}^1A_{4,3,3} = ({}^1A_0 \times IMU2)_{3,3}$$

$$\cos(q3) * \cos(q4) = ii * \cos(q1) + cc * \sin(q1) \quad \text{Ec. 2.3.3}$$

Dividiendo la Ec. 2.3.1 para la Ec. 2.3.3 y despejando q4 se tiene que:

$$q4 = \text{atan} \left( -\frac{gg * \cos(q1) + aa * \sin(q1)}{ii * \cos(q1) + cc * \sin(q1)} \right)$$

Para los valores de q5, q6 y q7 se tiene que:

$$IMU3 = {}^0A_7$$

La matriz inversa de  ${}^0A_4$  es igual a:

$$\left( {}^0A_4 \right)^{-1} = {}^4A_0$$

$$IMU3 = {}^0A_4 \times {}^4A_7, \quad \text{multiplicando ambos lados por } {}^4A_0$$

$${}^4A_0 \times IMU3 = {}^4A_0 \times {}^0A_4 \times {}^4A_7$$

$${}^4A_7 = {}^4A_0 \times IMU3$$

Remplazando los valores se tiene que:

$${}^4A_7 = \begin{bmatrix} {}^4A_{7,1,1} & {}^4A_{7,1,2} & {}^4A_{7,1,3} \\ {}^4A_{7,2,1} & {}^4A_{7,2,2} & {}^4A_{7,2,3} \\ {}^4A_{7,3,1} & {}^4A_{7,3,2} & {}^4A_{7,3,3} \end{bmatrix}$$

$$\begin{aligned} {}^4A_{7,1,1} = & ddd * (\cos(q4) * \sin(q2) + \cos(q2) * \sin(q3) * \sin(q4)) - aaa \\ & * (\cos(q3) * \sin(q1) * \sin(q4) - \cos(q1) * \cos(q2) * \cos(q4) \\ & + \cos(q1) * \sin(q2) * \sin(q3) * \sin(q4)) - ggg \\ & * (\cos(q2) * \cos(q4) * \sin(q1) + \cos(q1) * \cos(q3) * \sin(q4) \\ & - \sin(q1) * \sin(q2) * \sin(q3) * \sin(q4)) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} {}^4A_{7,1,2} = & eee * (\cos(q4) * \sin(q2) + \cos(q2) * \sin(q3) * \sin(q4)) - bbb \\ & * (\cos(q3) * \sin(q1) * \sin(q4) - \cos(q1) * \cos(q2) * \cos(q4) \\ & + \cos(q1) * \sin(q2) * \sin(q3) * \sin(q4)) - hhh \\ & * (\cos(q2) * \cos(q4) * \sin(q1) + \cos(q1) * \cos(q3) * \sin(q4) \\ & - \sin(q1) * \sin(q2) * \sin(q3) * \sin(q4)) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
{}^4A_{7_{1,3}} = & fff * (\cos(q4) * \sin(q2) + \cos(q2) * \sin(q3) * \sin(q4)) - ccc \\
& * (\cos(q3) * \sin(q1) * \sin(q4) - \cos(q1) * \cos(q2) * \cos(q4) \\
& + \cos(q1) * \sin(q2) * \sin(q3) * \sin(q4)) - iii * (\cos(q2) \\
& * \cos(q4) * \sin(q1) + \cos(q1) * \cos(q3) * \sin(q4) - \sin(q1) \\
& * \sin(q2) * \sin(q3) * \sin(q4))
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
{}^4A_{7_{2,1}} = & aaa * (\sin(q1) * \sin(q3) - \cos(q1) * \cos(q3) * \sin(q2)) + ggg \\
& * (\cos(q1) * \sin(q3) + \cos(q3) * \sin(q1) * \sin(q2)) + ddd \\
& * \cos(q2) * \cos(q3)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
{}^4A_{7_{2,2}} = & bbb * (\sin(q1) * \sin(q3) - \cos(q1) * \cos(q3) * \sin(q2)) + hhh \\
& * (\cos(q1) * \sin(q3) + \cos(q3) * \sin(q1) * \sin(q2)) + eee \\
& * \cos(q2) * \cos(q3)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
{}^4A_{7_{2,3}} = & ccc * (\sin(q1) * \sin(q3) - \cos(q1) * \cos(q3) * \sin(q2)) + iii \\
& * (\cos(q1) * \sin(q3) + \cos(q3) * \sin(q1) * \sin(q2)) + fff \\
& * \cos(q2) * \cos(q3)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
{}^4A_{7_{3,1}} = & ddd * (\sin(q2) * \sin(q4) - \cos(q2) * \cos(q4) * \sin(q3)) + aaa \\
& * (\cos(q1) * \cos(q2) * \sin(q4) + \cos(q3) * \cos(q4) * \sin(q1) \\
& + \cos(q1) * \cos(q4) * \sin(q2) * \sin(q3)) - ggg * (\cos(q2) \\
& * \sin(q1) * \sin(q4) - \cos(q1) * \cos(q3) * \cos(q4) + \cos(q4) \\
& * \sin(q1) * \sin(q2) * \sin(q3))
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
{}^4A_{7_{3,2}} = & eee * (\sin(q2) * \sin(q4) - \cos(q2) * \cos(q4) * \sin(q3)) + bbb \\
& * (\cos(q1) * \cos(q2) * \sin(q4) + \cos(q3) * \cos(q4) * \sin(q1) \\
& + \cos(q1) * \cos(q4) * \sin(q2) * \sin(q3)) - hhh * (\cos(q2) \\
& * \sin(q1) * \sin(q4) - \cos(q1) * \cos(q3) * \cos(q4) + \cos(q4) \\
& * \sin(q1) * \sin(q2) * \sin(q3))
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
{}^4A_{7,3,3} = & fff * (\sin(q2) * \sin(q4) - \cos(q2) * \cos(q4) * \sin(q3)) + ccc \\
& * (\cos(q1) * \cos(q2) * \sin(q4) + \cos(q3) * \cos(q4) * \sin(q1) \\
& + \cos(q1) * \cos(q4) * \sin(q2) * \sin(q3)) - iii * (\cos(q2) \\
& * \sin(q1) * \sin(q4) - \cos(q1) * \cos(q3) * \cos(q4) + \cos(q4) \\
& * \sin(q1) * \sin(q2) * \sin(q3))
\end{aligned}$$

La matriz de rotación para el IMU3 de  ${}^4A_7$  es:

$${}^4A_7 = {}^4A_5 \times {}^5A_6 \times {}^6A_7$$

Remplazando y operando se tiene que:

$${}^4A_7 = \begin{bmatrix} {}^4A_{7,1,1} & {}^4A_{7,1,2} & {}^4A_{7,1,3} \\ {}^4A_{7,2,1} & {}^4A_{7,2,2} & {}^4A_{7,2,3} \\ {}^4A_{7,3,1} & {}^4A_{7,3,2} & {}^4A_{7,3,3} \end{bmatrix}$$

$${}^4A_{7,1,1} = \cos(q5) * \cos(q7) + \sin(q5) * \sin(q6) * \sin(q7)$$

$${}^4A_{7,1,2} = \cos(q7) * \sin(q5) * \sin(q6) - \cos(q5) * \sin(q7)$$

$${}^4A_{7,1,3} = \cos(q6) * \sin(q5)$$

$${}^4A_{7,2,1} = \cos(q6) * \sin(q7)$$

$${}^4A_{7,2,2} = \cos(q6) * \cos(q7)$$

$${}^4A_{7,2,3} = -\sin(q6)$$

$${}^4A_{7,3,1} = \cos(q5) * \sin(q6) * \sin(q7) - \cos(q7) * \sin(q5)$$

$${}^4A_{7,3,2} = \sin(q5) * \sin(q7) + \cos(q5) * \cos(q7) * \sin(q6)$$

$${}^4A_{7,3,3} = \cos(q5) * \cos(q6)$$

Igualando el valor de  ${}^4A_{7_{1,3}}$  en la matriz de rotación con el valor de la multiplicación de  ${}^4A_0 \times IMU3$  se tiene que:

$${}^4A_{7_{1,3}} = ({}^4A_0 \times IMU3)_{1,3}$$

$$\begin{aligned} \cos(q6) * \sin(q5) = & fff * (\cos(q4) * \sin(q2) + \cos(q2) * \sin(q3) * \sin(q4)) - ccc * \\ & (\cos(q3) * \sin(q1) * \sin(q4) - \cos(q1) * \cos(q2) * \cos(q4) + \\ & \cos(q1) * \sin(q2) * \sin(q3) * \sin(q4)) - iii * (\cos(q2) * \cos(q4) * \\ & \sin(q1) + \cos(q1) * \cos(q3) * \sin(q4) - \sin(q1) * \sin(q2) * \\ & \sin(q3) * \sin(q4)) \end{aligned} \quad Ec. 3.1.3$$

Igualando el valor de  ${}^4A_{7_{3,3}}$  en la matriz de rotación con el valor de la multiplicación de  ${}^4A_0 \times IMU3$  se tiene que:

$${}^4A_{7_{3,3}} = ({}^4A_0 \times IMU3)_{3,3}$$

$$\begin{aligned} \cos(q5) * \cos(q6) = & fff * (\sin(q2) * \sin(q4) - \cos(q2) * \cos(q4) * \\ & \sin(q3)) + ccc * (\cos(q1) * \cos(q2) * \sin(q4) + \cos(q3) * \\ & \cos(q4) * \sin(q1) + \cos(q1) * \cos(q4) * \sin(q2) * \\ & \sin(q3)) - iii * (\cos(q2) * \sin(q1) * \sin(q4) - \cos(q1) * \\ & \cos(q3) * \cos(q4) + \cos(q4) * \sin(q1) * \sin(q2) * \\ & \sin(q3)) \end{aligned} \quad Ec. 3.3.3$$

Dividiendo la Ec. 3.1.3 para la Ec. 3.3.3 y despejando q5 se tiene que:

$$q5 = \text{atan}\left(\frac{\text{numerador}}{\text{denominador}}\right)$$

$$\begin{aligned} \text{numerador} = & fff * (\cos(q4) * \sin(q2) + \cos(q2) * \sin(q3) * \sin(q4)) - ccc \\ & * (\cos(q3) * \sin(q1) * \sin(q4) - \cos(q1) * \cos(q2) * \cos(q4) \\ & + \cos(q1) * \sin(q2) * \sin(q3) * \sin(q4)) - iii \\ & * (\cos(q2) * \cos(q4) * \sin(q1) + \cos(q1) * \cos(q3) * \sin(q4) \\ & - \sin(q1) * \sin(q2) * \sin(q3) * \sin(q4)) \end{aligned}$$

denominador

$$\begin{aligned}
 &= fff * (\sin(q2) * \sin(q4) - \cos(q2) * \cos(q4) * \sin(q3)) \\
 &+ ccc * (\cos(q1) * \cos(q2) * \sin(q4) + \cos(q3) * \cos(q4) \\
 &* \sin(q1) + \cos(q1) * \cos(q4) * \sin(q2) * \sin(q3)) - iii \\
 &* (\cos(q2) * \sin(q1) * \sin(q4) - \cos(q1) * \cos(q3) * \cos(q4) \\
 &+ \cos(q4) * \sin(q1) * \sin(q2) * \sin(q3))
 \end{aligned}$$

Igualando el valor de  ${}^4A_{7,3}$  en la matriz de rotación con el valor de la multiplicación de  ${}^4A_0 \times IMU3$  se tiene que:

$${}^4A_{7,3} = ({}^4A_0 \times IMU3)_{2,3}$$

$$\begin{aligned}
 -\sin(q6) = &ccc * (\sin(q1) * \sin(q3) - \cos(q1) * \cos(q3) * \sin(q2)) + iii * \\
 &(\cos(q1) * \sin(q3) + \cos(q3) * \sin(q1) * \sin(q2)) + fff * \\
 &\cos(q2) * \cos(q3) \quad Ec. 3.2.3
 \end{aligned}$$

Despejando q6 en Ec. 3.2.3 se tiene que:

$$\begin{aligned}
 q6 = &-asin(ccc * (\sin(q1) * \sin(q3) - \cos(q1) * \cos(q3) * \sin(q2)) + iii * \\
 &(\cos(q1) * \sin(q3) + \cos(q3) * \sin(q1) * \sin(q2)) + fff * \cos(q2) * \\
 &\cos(q3))
 \end{aligned}$$

Igualando el valor de  ${}^4A_{7,1}$  en la matriz de rotación con el valor de la multiplicación de  ${}^4A_0 \times IMU3$  se tiene que:

$${}^4A_{7,1} = ({}^4A_0 \times IMU3)_{2,1}$$

$$\begin{aligned}
 \cos(q6) * \sin(q7) = &aaa * (\sin(q1) * \sin(q3) - \cos(q1) * \cos(q3) * \\
 &\sin(q2)) + ggg * (\cos(q1) * \sin(q3) + \cos(q3) * \sin(q1) * \\
 &\sin(q2)) + ddd * \cos(q2) * \cos(q3) \quad Ec. 3.2.1
 \end{aligned}$$

Igualando el valor de  ${}^4A_{7,2}$  en la matriz de rotación con el valor de la multiplicación de  ${}^4A_0 \times IMU3$  se tiene que:

$${}^4A_{7,2,2} = ({}^4A_0 \times IMU3)_{2,2}$$

$$\begin{aligned} \cos(q6) * \cos(q7) = & bbb * (\sin(q1) * \sin(q3) - \cos(q1) * \cos(q3) * \sin(q2)) + \\ & hhh * (\cos(q1) * \sin(q3) + \cos(q3) * \sin(q1) * \sin(q2)) + \\ & eee * \cos(q2) * \cos(q3) \quad \text{Ec. 3.2.2} \end{aligned}$$

Dividiendo la Ec. 3.2.1 para la Ec. 3.2.2 y despejando q7 se tiene que:

$$q7 = \text{atan}\left(\frac{\text{numerador}}{\text{denominador}}\right)$$

$$\begin{aligned} \text{numerador} = & aaa * (\sin(q1) * \sin(q3) - \cos(q1) * \cos(q3) * \sin(q2)) \\ & + ggg * (\cos(q1) * \sin(q3) + \cos(q3) * \sin(q1) * \sin(q2)) \\ & + ddd * \cos(q2) * \cos(q3) \end{aligned}$$

*denominador*

$$\begin{aligned} = & bbb * (\sin(q1) * \sin(q3) - \cos(q1) * \cos(q3) * \sin(q2)) \\ & + hhh * (\cos(q1) * \sin(q3) + \cos(q3) * \sin(q1) * \sin(q2)) \\ & + eee * \cos(q2) * \cos(q3) \end{aligned}$$

### 3.5.3 Análisis dinámico

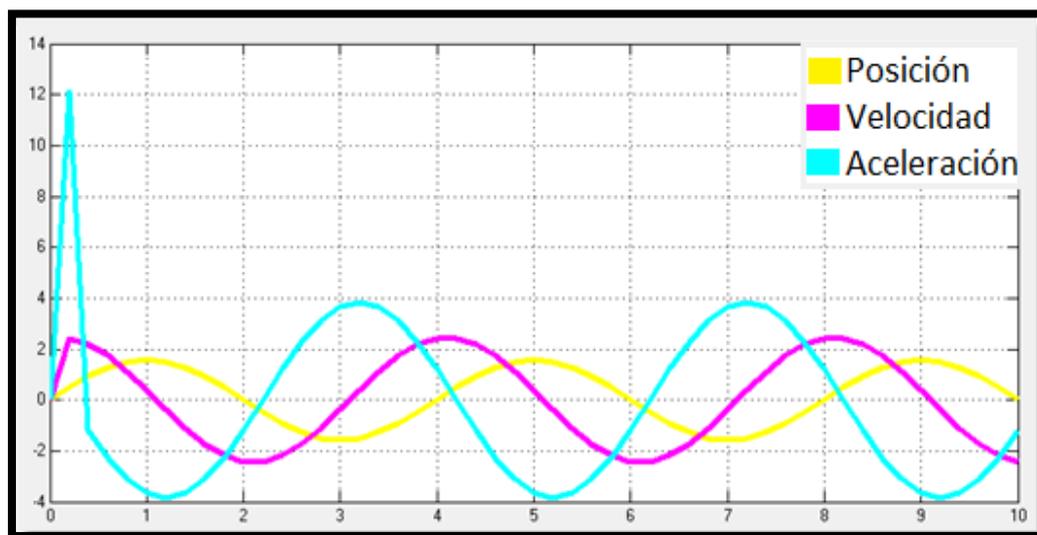
En este apartado se realizará el análisis dinámico del brazo robótico a partir de los resultados obtenidos de la simulación en diagramas de bloques en Matlab. Los resultados consisten en obtener los valores de las reacciones de torque que se producen en las articulaciones del robot.

Este análisis servirá para conocer y evaluar los requerimientos de torque y velocidad de los servomotores que se ocuparán en el proyecto. Uno de los requerimientos principales del robot, es que la velocidad de movimiento sea la mayor posible, para que pueda realizar el seguimiento en tiempo real del operador humano de la mejor manera. Por tal motivo se ha fijado un valor mínimo de velocidad que debe conseguir cada motor, 90 grados en un segundo.

Se ha generado una señal de posición de tipo sinodal, la cual servirá de entrada para las articulaciones del robot. Esta señal ingresa en el bloque “Joint Actuator” la cual controla el movimiento de la articulación. La frecuencia de la señal es de 1.57 rad/seg y con una amplitud de 90 grados.

La señal de posición generada se puede observar en la Figura 50 junta con la señal de velocidad y aceleración que se derivan de esta.

El programa de simulación calcula automáticamente las reacciones de fuerza y torque tomando todos los datos ingresados previamente como: la señal de entrada en las articulaciones, los valores de masa, inercia y las dimensiones de las piezas que forman el brazo robótico.

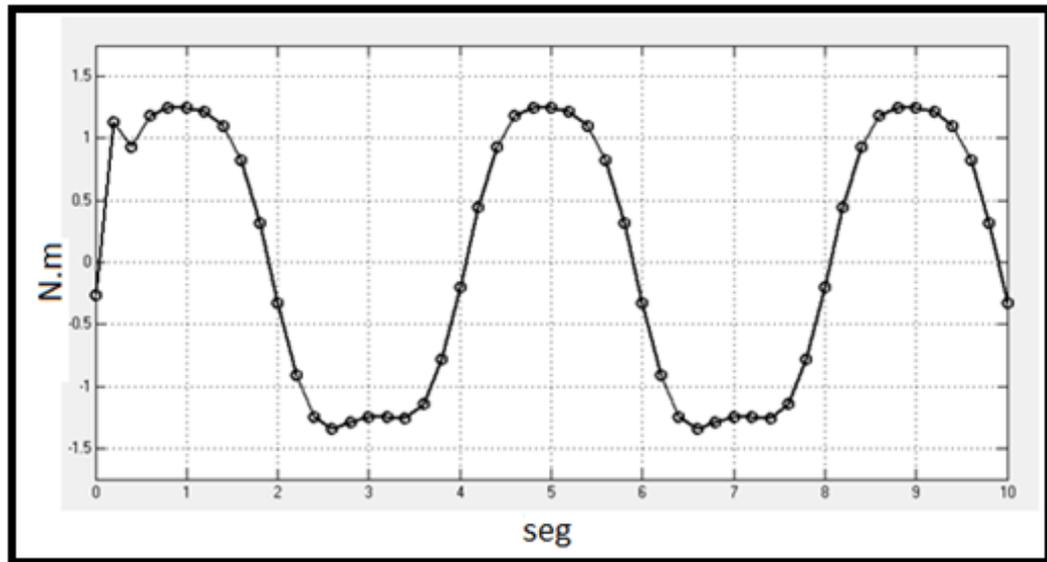


**Figura 50 Señal de entrada**

### 3.5.3.1 Articulación 1

Los resultados de la Figura 51 indican una similitud en su forma senoidal con la señal de entrada, e indican el torque generado en esta articulación. Sus valores de pico máximo y mínimo son de 1.25 N.m y -1.34 N.m respectivamente tomados desde la posición Home. Su pequeña variación se debe a distintas formas, dimensiones y posición de las piezas del robot ya que no es simétrico en su plano trasversal. La variación pequeña que se

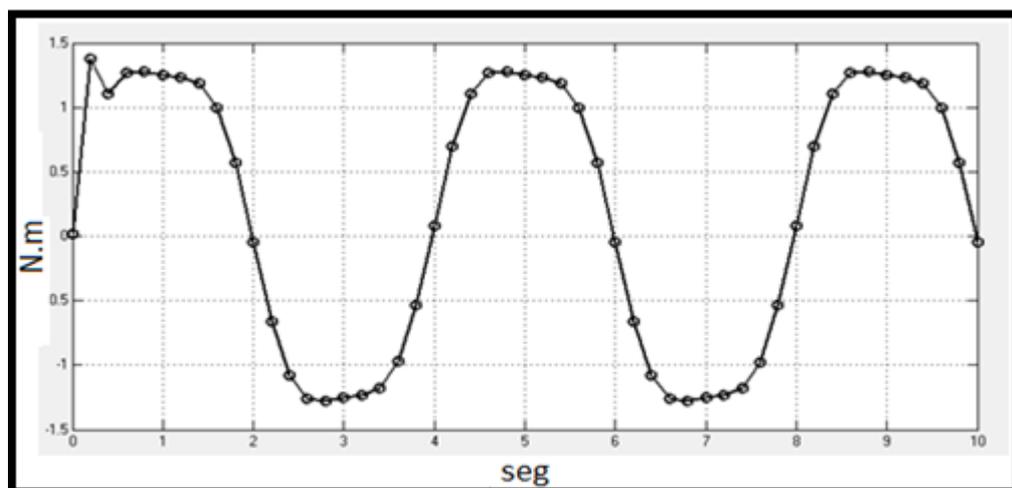
observa indica que el motor realiza un esfuerzo similar al levantar el brazo en sentido horario como en sentido anti horario.



**Figura 51 Articulación 1**

### 3.5.3.2 Articulación 2

Los resultados de la Figura 52 indican una similitud en su forma senoidal con la señal de entrada. Sus valores de pico máximo y mínimo son de 1.37 N.m y -1.27 N.m respectivamente tomados desde la posición Home. La grafica es similar a la figura de la articulación uno, debido a que estas se encuentran en una posición muy cercana.



**Figura 52 Articulación 2**

### 3.5.3.3 Articulación 3

Los resultados de la Figura 53 indican una similitud en su forma senoidal con la señal de entrada. Sus valores de pico máximo y mínimo son de 0.044 N.m y -0.35 N.m respectivamente tomados desde la posición de la Figura 61 máximo torque servo 3. Se observa que existe una variación de torque entre la trayectoria de subida con respecto a la de bajada, debido principalmente a la acción de la gravedad, ya que comienza el eslabón desde una posición de torque máximo. El motor hace su mayor esfuerzo en un sentido para vencer la gravedad que se opone al movimiento de subida, mientras que la misma gravedad beneficia al movimiento en el sentido opuesto. Es por esto que la variación de torque se ubica debajo del eje horizontal.

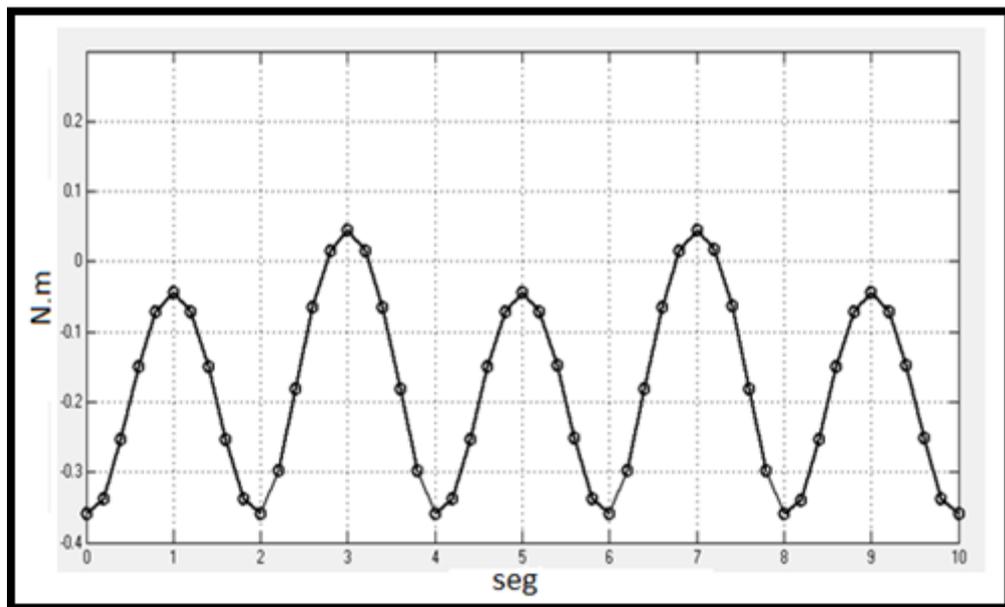
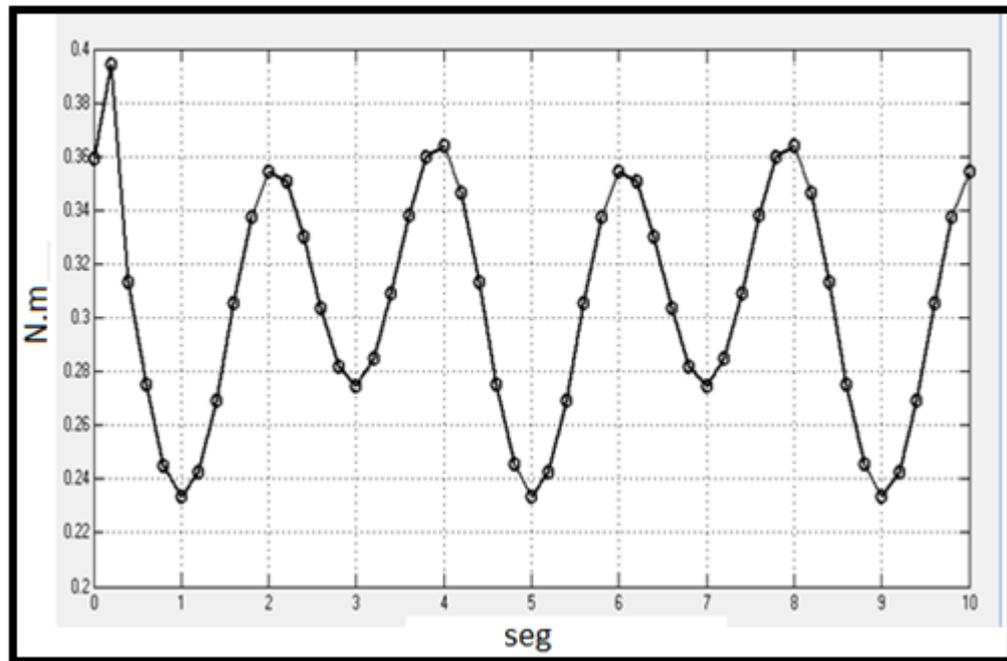


Figura 53 Articulación 3

### 3.5.3.4 Articulación 4

Los resultados de la Figura 54 indican una similitud en su forma senoidal con la señal de entrada, la cual en este caso tiene una amplitud de 45 grados. Sus valores de pico máximo y mínimo son de 0.36 N.m y 0.23 N.m respectivamente tomados desde la posición Home con el codo flexionado 90 grados. Se observa que existe una variación de torque entre la trayectoria de

subida con respecto a la de bajada, debido principalmente a la acción de la gravedad, ya que comienza el eslabón desde una posición de torque máximo.

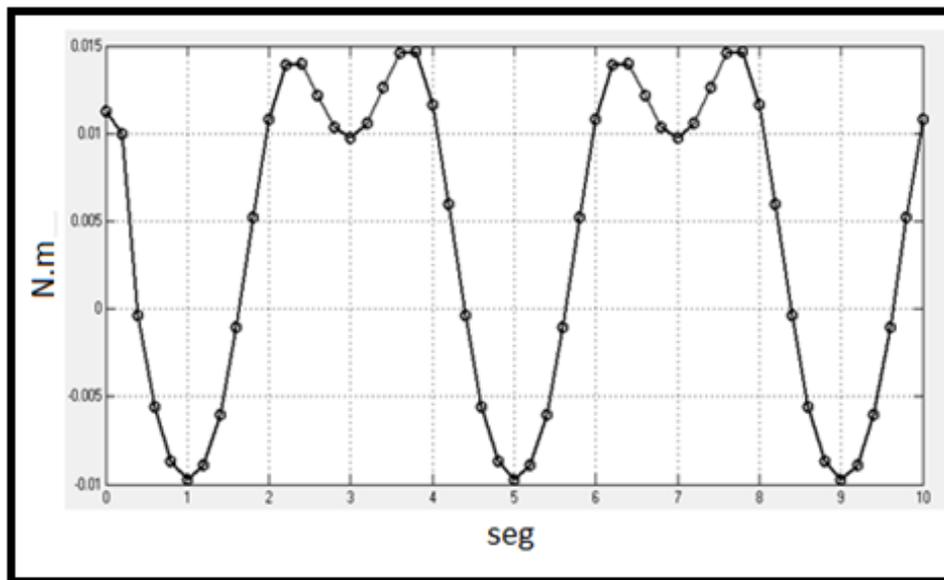


**Figura 54 Articulación 4**

El motor hace su mayor esfuerzo en un sentido para vencer la gravedad que se opone al movimiento de subida, mientras que la misma gravedad beneficia al movimiento en el sentido opuesto. Es por esto que la variación de torque se ubica únicamente por encima del eje horizontal

### 3.5.3.5 Articulación 5

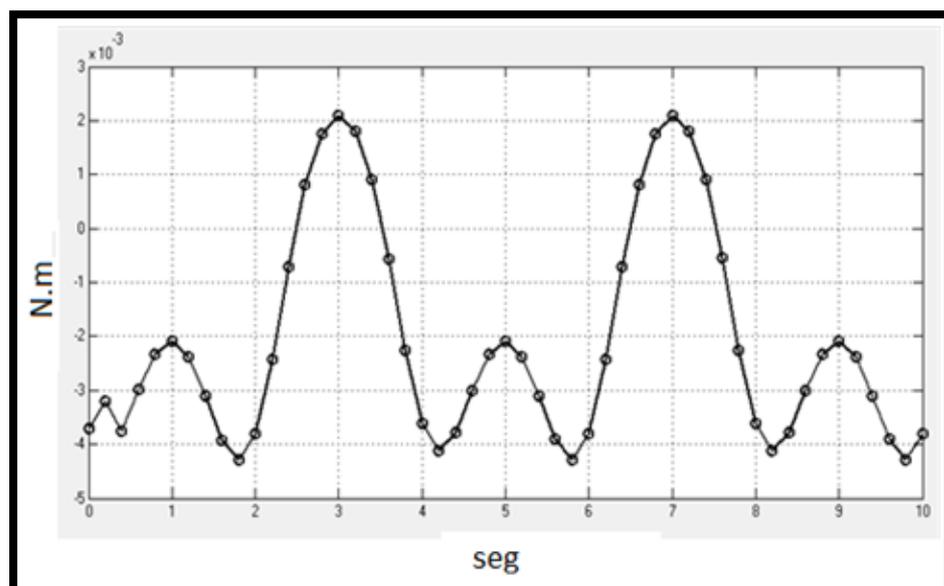
En la Figura 55 se encuentran sus valores de pico máximo y mínimo que son de 0.015 N.m y -0.01 N.m respectivamente tomados desde la posición Home con el hombro flexionado 90 grados en el plano sagital. De igual manera existe una variación de torque entre la trayectoria de subida con respecto a la de bajada, debido a la acción de la gravedad.



**Figura 55 Articulación 5**

### 3.5.3.6 Articulación 6

En la Figura 56 se encuentran sus valores de pico máximo y mínimo que son de  $2e-3$  N.m y  $-4.3e-3$  N.m respectivamente tomados desde la posición Home con el hombro flexionado 90 grados en el plano sagital. De igual manera existe una variación de torque entre la trayectoria de subida con respecto a la de bajada, debido a la acción de la gravedad.



**Figura 56 Articulación 6**

### 3.5.3.7 Articulación 7

En la Figura 57 se encuentran sus valores de pico máximo y mínimo que son de  $3e-3$  N.m y  $-2.2e-3$  N.m respectivamente tomados desde la posición Home con el hombro flexionado 90 grados en el plano sagital. De igual manera existe una variación de torque entre la trayectoria de subida con respecto a la de bajada, debido a la acción de la gravedad.

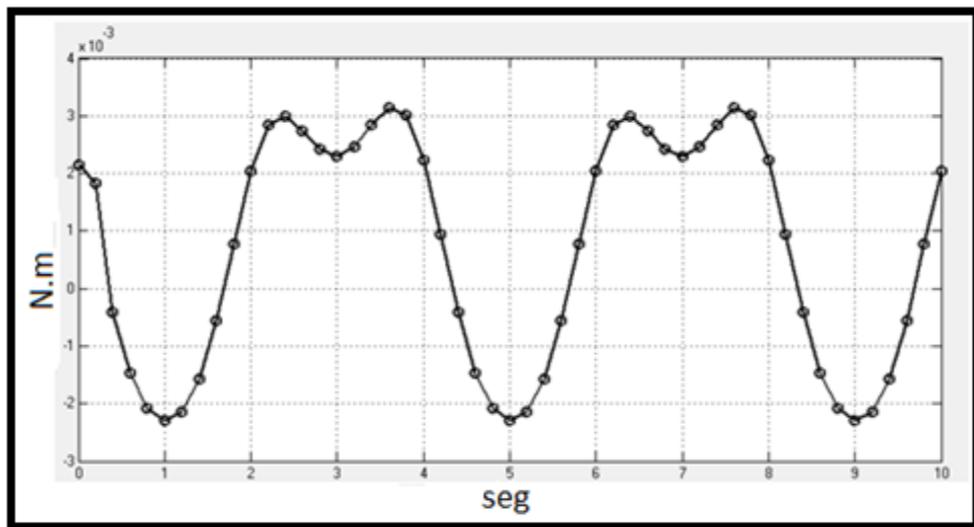
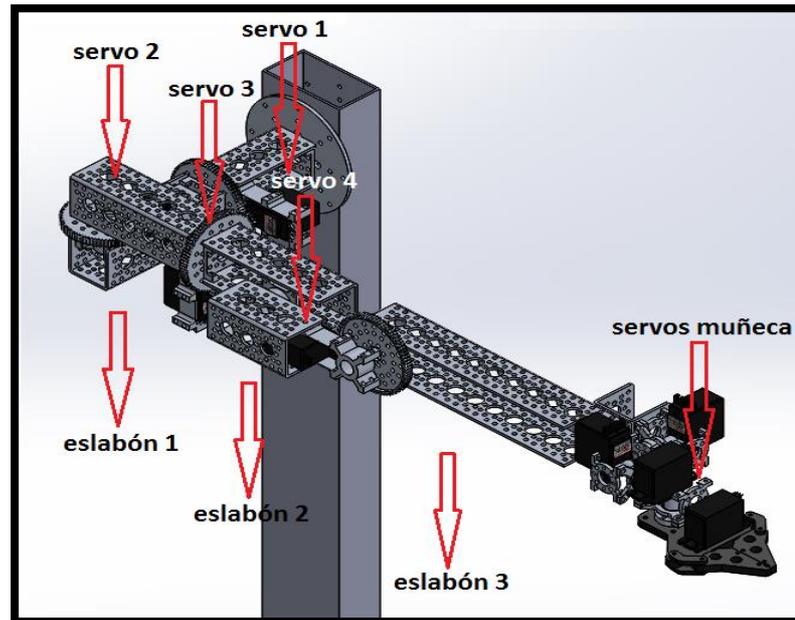


Figura 57 Articulación 7

## 3.6 DIMENSIONAMIENTO Y SELECCIÓN DE ACTUADORES

Los servomotores usados para el ensamble del robot son todos de tamaño estándar de marca Hitec. Para su selección se consideró principalmente el torque requerido para poder levantar el peso de cada uno de los elementos del brazo robótico y la velocidad de respuesta de cada uno de los servos, para que logre imitar el movimiento del brazo en tiempo real.

Para realizar el cálculo de los servomotores que van estar sometidos a los mayores esfuerzos, que se utilizan para el posicionamiento del robot excluyendo los servos para orientación, en este caso servirán para el siguiente análisis estático los servo 1, servo 2, servo 3 y servo 4. Una vez determinado el torque de estos servos, se podrá escoger dentro del catálogo de Hitec los servos a utilizar en este proyecto.



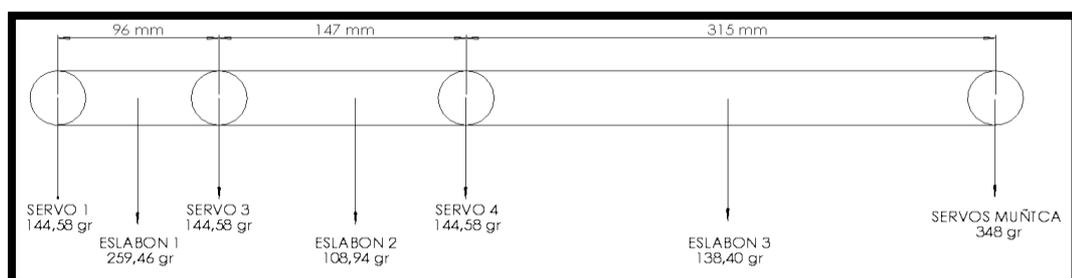
**Figura 58 Distribución de servos y eslabones**

En la Figura 58 se puede observar al brazo robótico diseñado y simulado en el software CAD, donde se identifican los servos y eslabones constituyentes del sistema robótico.

La fórmula usada para determinar el torque es la siguiente:

$$\text{Torque} = \text{Fuerza} \times \text{Distancia}$$

Realizando la sumatoria de torque para el servo1 se tiene:



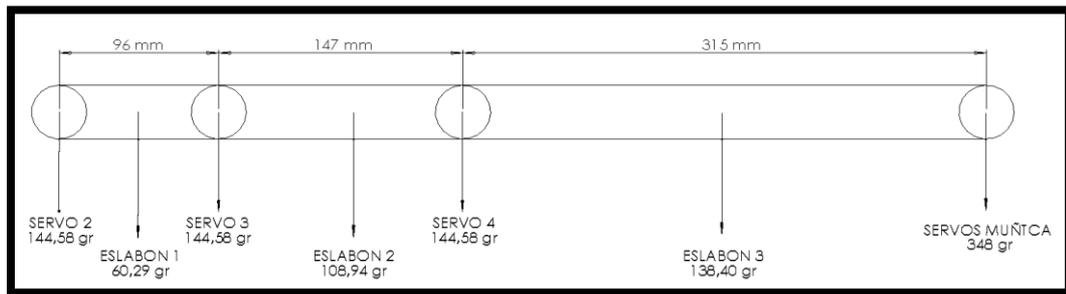
**Figura 59 DCL servo1**

$$\begin{aligned} \text{Torque}_{\text{servo1}} = & 259.46\text{gr} \times 48\text{mm} + 144.58\text{gr} \times 96\text{mm} + 108.94\text{gr} \times \\ & 169.5\text{mm} + 144.58\text{gr} \times 243\text{mm} + 138.40\text{gr} \times 400.5\text{mm} + \\ & 348\text{gr} \times 558\text{mm} \end{aligned}$$

$$Torque_{servo1} = 12.45 + 13.88 + 18.47 + 35.13 + 55.43 + 194.18 \text{ [kgf. mm]}$$

$$Torque_{servo1} = 329.55 \text{ [kgf. mm]}$$

Realizando la sumatoria de torque para el servo2 se tiene que:



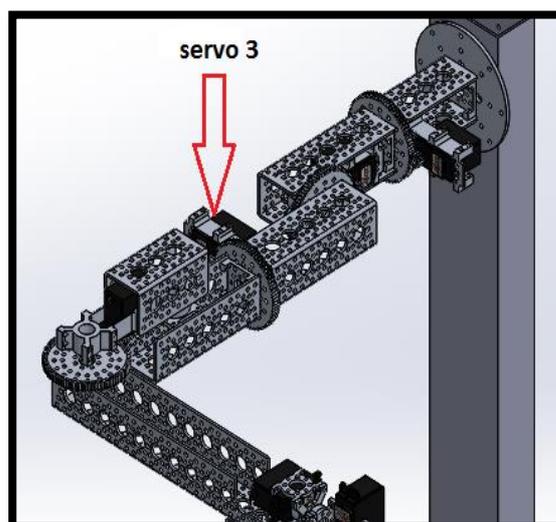
**Figura 60 DCL servo2**

$$Torque_{servo2} = 60.29gr \times 48mm + 144.58gr \times 96mm + 108.94gr \times 169.5mm + 144.58gr \times 243mm + 138.40gr \times 400.5mm + 348gr \times 558mm$$

$$Torque_{servo2} = 2.89 + 13.88 + 18.47 + 35.13 + 55.43 + 194.18 \text{ [kgf. mm]}$$

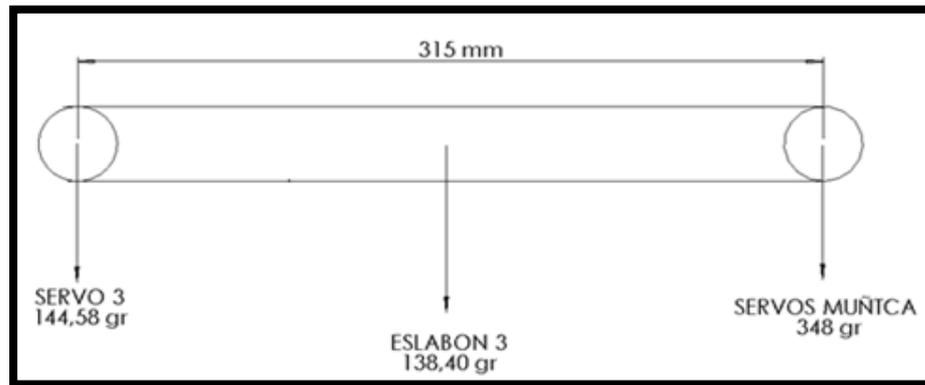
$$Torque_{servo2} = 320 \text{ [kgf. mm]}$$

Para el servo3 cuando se encuentre el brazo en posición que se mostrara a continuación realizara su máximo torque.



**Figura 61 Máximo torque servo3**

Realizando la sumatoria de torque para el servo3 tomando como referencia el diagrama de cuerpo libre de la Figura 62 se tiene que:



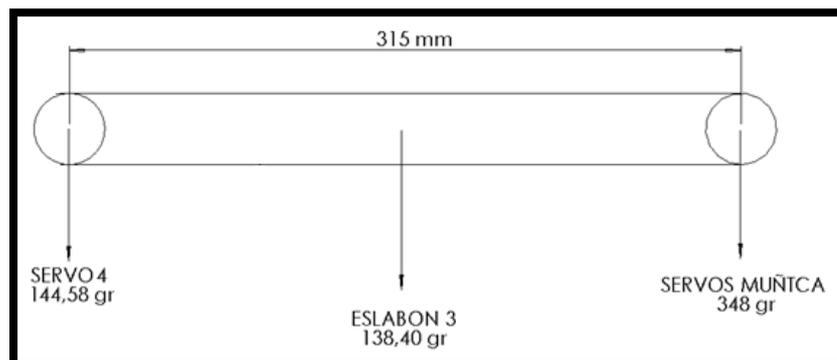
**Figura 62 DCL servo3**

$$Torque_{servo3} = 138.40gr \times 157.50mm + 348gr \times 315mm$$

$$Torque_{servo3} = 21.80 + 109.62 [kgf.mm]$$

$$Torque_{servo3} = 131.42 [kgf.mm]$$

Realizando la sumatoria de torque para el servo4 referenciándonos del diagrama de cuerpo libre de la Figura 63 se tiene que:



**Figura 63 DCL servo4**

$$Torque_{servo4} = 138.40gr \times 157.50mm + 348gr \times 315mm$$

$$Torque_{servo4} = 131.42 [kgf.mm]$$

Con los valores teóricos obtenidos de torque en ese análisis estático junto con los valores obtenidos del análisis dinámico del robot realizado en el apartado anterior, se procede a buscar en los catálogos los motores requeridos para el proyecto, se ha empleado para los servo1, servo2, servo3 y servo4 el modelo Hitec HS-5685HB cuyas características se presentan en la Tabla 11.

**Tabla 11**  
**Especificaciones HS-5685 MH**

Fabricante	HITEC	
Sistema de control	PWM (Modulación por ancho de pulso)	
Voltaje de operación	4.8 - 7.4 VDC	
Temperatura de trabajo	(-)20 a (+)60°C	
Tipo de motor	3-Pole Ferrite	
Dimensiones	41 X 20 X 38 (mm)	
Tipo de engranajes	Engranajes de metal	
Peso	60 gr	
Torque	8.8 Kg.cm a 6 VDC	12.9 Kg.cm a 7.4 VDC
Corriente	200mA/libre y	240mA/libre y
Corriente	2A/con carga	3A/con carga
Velocidad	0.20sec/60° sin carga	0.15sec/60° sin carga

Mediante las distintas relaciones de engranajes que Actobotics ofrece, se ha decidido utilizar estos servos con las siguientes relaciones de transmisión para que dé el torque requerido. (Tabla 12)

**Tabla 12**  
**Especificaciones servo gearbox ensamble HS-5685MH**

SPG5685A-CM-360	Rotación	Peso (gr)	6.0V Torque (kgf*mm)	7.4V Power (kgf*mm)	6.0V Speed (sec/60°)	7.4V Speed (sec/60°)
(2:1 ratio)	0°- 400°	144.58	226	257	0.4 sec.	0.34
(3:1 ratio)	0°- 400°	144.58	339	386	0.6 sec.	0.51
(3.8:1 ratio)	0°- 400°	144.58	429	489	0.76 sec.	0.646

El servo1 y el servo2 son los de mayor torque requerido por lo que se utiliza la relación 3.8:1 con 489 kgf\*mm a 7.4 VDC. El servo3 utiliza una relación 3:1 con 386 kgf\*mm a 7.4 VDC. El servo4 utiliza una relación de

trasmisión 2:1 con 257 kgf\*mm a 7.4 VDC que es mayor que el torque teórico estático y dinámico para obtener un mejor funcionamiento.

Los servos utilizados para poder realizar los movimientos de la muñeca son los HS-5495 HB (Tabla 13) ideales para trabajo en conjunto con ServoBlocks de Actobotics, según la recomendación del fabricante, estos se ocupara en el diseño de la muñeca.

**Tabla 13**  
**Especificaciones HS-5495 HB**

Fabricante	HITEC	
Sistema de control	PWM (Modulación por ancho de pulso)	
Voltaje de operación	6.0 - 7.4 VDC	
Temperatura de trabajo	(-)20 a (+)60°C	
Tipo de motor	3-Pole Ferrite	
Dimensiones	41 X 20 X 38 (mm)	
Tipo de engranajes	Engranajes de carbón	
Peso	60 gr	
Torque	6.4 Kg.cm a 6 VDC	7.5 Kg.cm a 7.4 VDC
Corriente	170mA/libre y	190mA/libre y
	1200mA/con carga	1400mA/con carga
Velocidad	0.17sec/60° sin carga	0.15sec/60° sin carga

Y finalmente el actuador que se utilizó para la pinza es el modelo Hitec HS-322HD ideal para el kit pinza paralela, las características del servo se presentan en la Tabla 14.

**Tabla 14**  
**Especificaciones HS-322HD**

Fabricante	HITEC	
Sistema de control	PWM (Modulación por ancho de pulso)	
Voltaje de operación	4.8 - 6 VDC	
Temperatura de trabajo	(-)20 a (+)60°C	
Ancho de banda muerta	5us	
Tipo de motor	Cepillo de núcleo metálico	
Dimensiones	39.9x19.8x36.3 mm	
Tipo de engranajes	Engranajes de Nylon	
Peso	43 g	
Torque	3 Kg.cm a 4.8 VDC	3.7 Kg.cm a 6 VDC

<b>Corriente</b>	160mA/libre y	180mA/libre y
	600mA/con carga	700mA/con carga
<b>Velocidad</b>	0.19sec/60° sin carga	0.15sec/60° sin carga

A continuación se describe en la Tabla 15 una comparación entre los torques teóricos requeridos provenientes del análisis estático y dinámico frente los torques de los motores seleccionados.

**Tabla 15**  
**Comparación torque**

	Torque Máximo [kgf.mm]			Factor de seguridad	
	Estático	Dinámico	Actuador	Estático	Dinámico
<b>Servo 1</b>	330	136	489	1,48	3,60
<b>Servo 2</b>	320	139	489	1,53	3,52
<b>Servo 3</b>	131	36	386	2,95	10,72
<b>Servo 4</b>	131	37	257	1,96	6,95
	<b>Promedio</b>			1,98	6,20

De la Tabla 15 se puede observar el factor de seguridad estático mínimo de 1.48 para el servo 1 y el factor de seguridad dinámico mínimo de 3.52 para el servo 2, el cual es semejante al factor de seguridad dinámico del servo 1. Se puede decir que el servo 1 es el que soporta más carga, por lo que alcanzara su capacidad máxima de torque antes que los demás, seguidos por el servo dos de características y ubicación semejantes.

### 3.7 ENSAMBLAJE DEL BRAZO ROBÓTICO

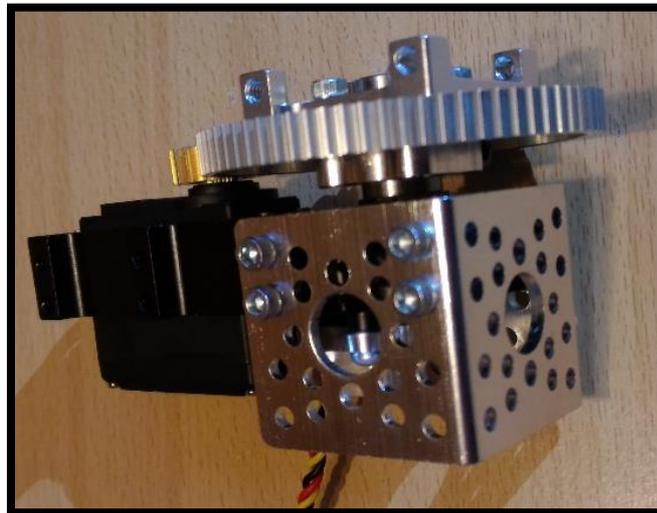
En los siguientes puntos se muestra el ensamble del brazo robótico considerando cada una de las partes del brazo ítem.

#### 3.7.1 Ensamble del hombro

##### Articulación 1

Para que el hombro del brazo robótico realice los movimientos de flexión y extensión, se acopla directamente a un servo gearbox, ensamble HS-5685MH de 3.8:1 relación de transmisión, a un channel de 3.81 cm largo. En la parte lateral del engrane del servo gearbox se acopla un quad hub mount

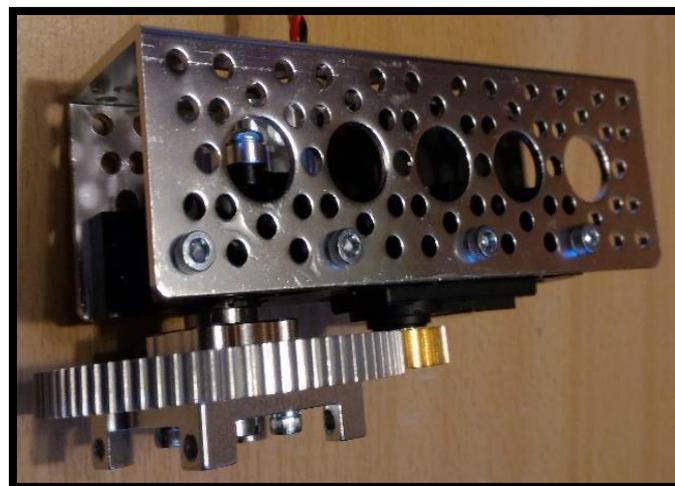
90° tipo C. Mediante éste último se puede unir otro channel pre-ensamblado con la articulación 2 del hombro como lo muestra la Figura 64.



**Figura 64 Articulación 1 hombro**

### **Articulación 2**

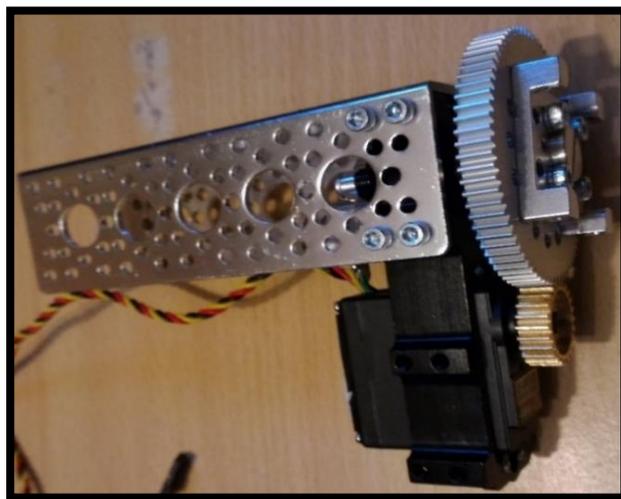
Para que el hombro del brazo robótico realice los movimientos de abducción y aducción, se acopla directamente otro servo gearbox, ensamble HS-5685MH de 3.8:1 relación de transmisión, a un channel de 11.43 cm de largo y se ha unido en la parte lateral del engrane de este servo gearbox un quad hub mount 90° tipo C como lo muestra la Figura 65.



**Figura 65 Articulación 2 hombro**

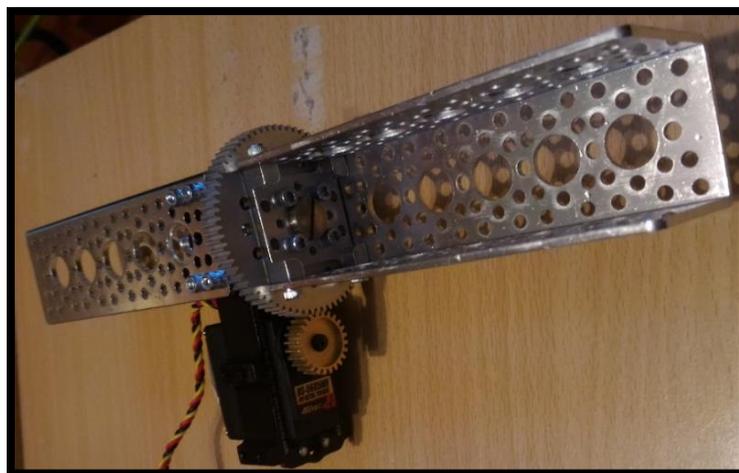
### Articulación 3

Para que el hombro del brazo robótico realice los movimientos de rotación interna y rotación externa, se acopla directamente a otro servo gearbox, ensamble HS-5685MH de 3:1 relación de transmisión, a un channel de 11.43 cm de largo y se acopla en la parte lateral del engrane de este servo gearbox un quad hub mount 90° tipo C como lo muestra la Figura 66.



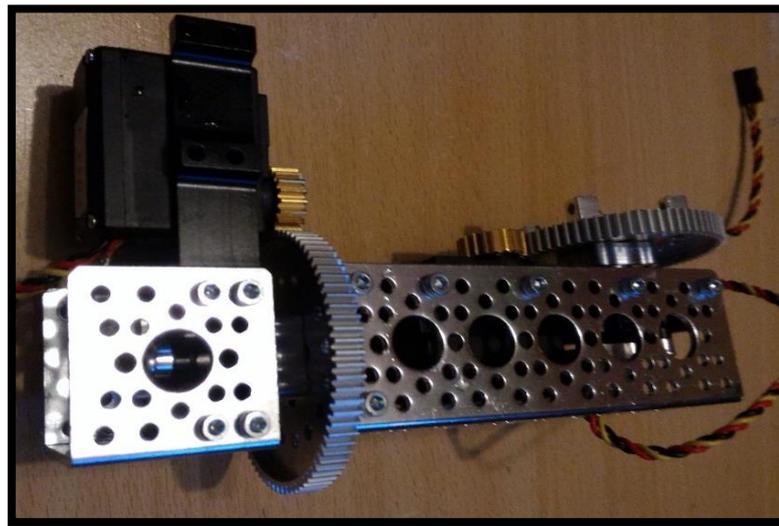
**Figura 66 Articulación 3.1 hombro**

Después se acopla a el quad hub mount 90° tipo C que está en el engrane del servo gearbox de la articulación 3, al channel de 11.43 cm teniendo como resultado lo que se observa en la Figura 67.



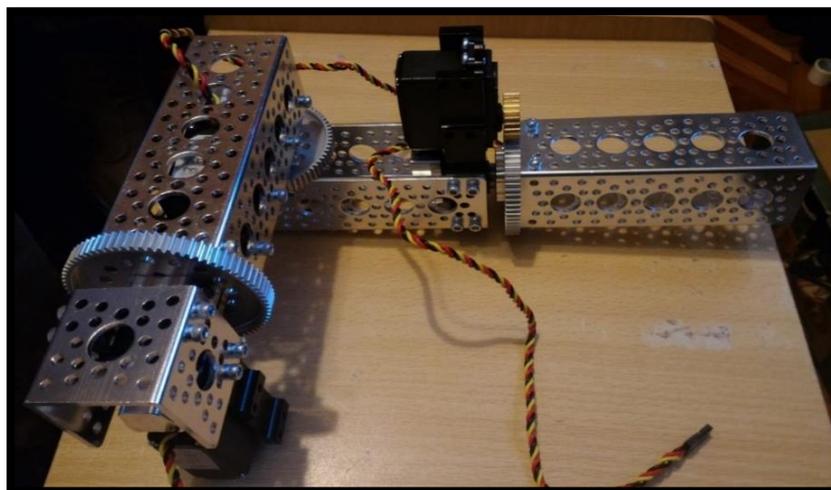
**Figura 67 Articulación 3.2 hombro**

Al unir las tres articulaciones se tiene al hombro de nuestro brazo robótico; mediante el quad hub mount 90° tipo C que está en el engrane del servo gearbox de la articulación 1 unimos el channel de 11.43 cm que tiene acoplado al otro servo gearbox de la articulación 2 teniendo como resultado lo observado en la Figura 68.



**Figura 68 Articulación 1 y 2 hombro**

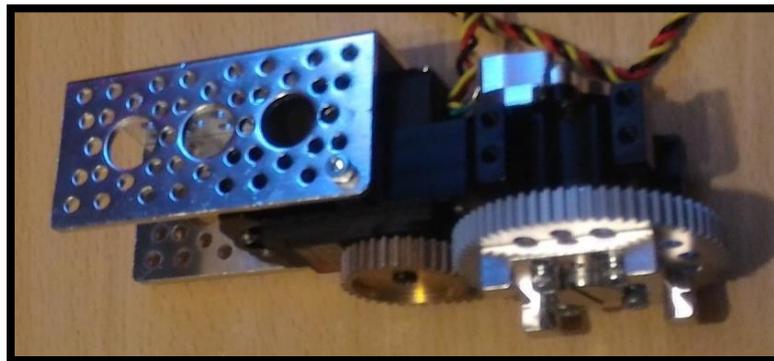
Mediante el quad hub mount 90° tipo C que está en el engrane del servo gearbox de la articulación 2 unimos el channel de 11.43 cm que tiene acoplado al otro servo gearbox de la articulación 3 teniendo como resultado lo observado en la Figura 69.



**Figura 69 Hombro brazo robótico**

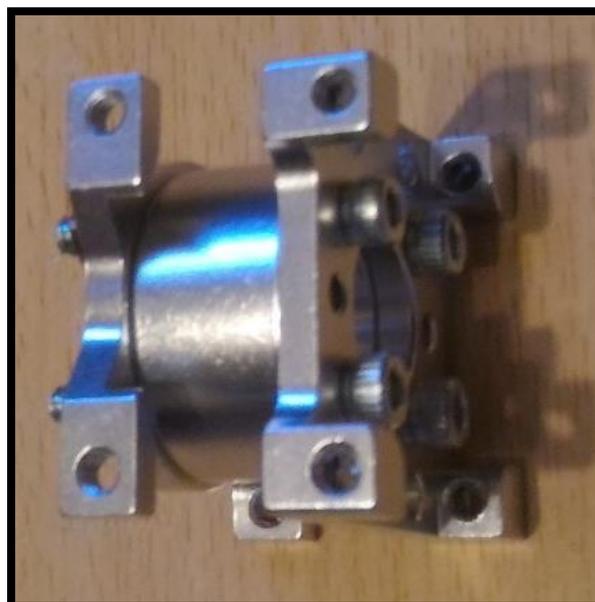
### 3.7.2 Ensamble del codo

Para que el codo del brazo robótico realice los movimientos de flexión y extensión, se acopla directamente a un servo gearbox, ensamble HS-5685MH de 2:1 relación de transmisión, a un channel de 7.62 cm largo y se acopla en la parte lateral del engrane del servo gearbox un quad hub mount 90° tipo C como lo muestra la Figura 70.



**Figura 70 Articulación 1 codo**

Para poder unir el ensamble del codo con la del hombro, se utilizó un spacer acoplado a dos quad hub mount 90° del tipo C y B, uno de cada lado del spacer como lo muestra la Figura 71.



**Figura 71 Acople spacer**

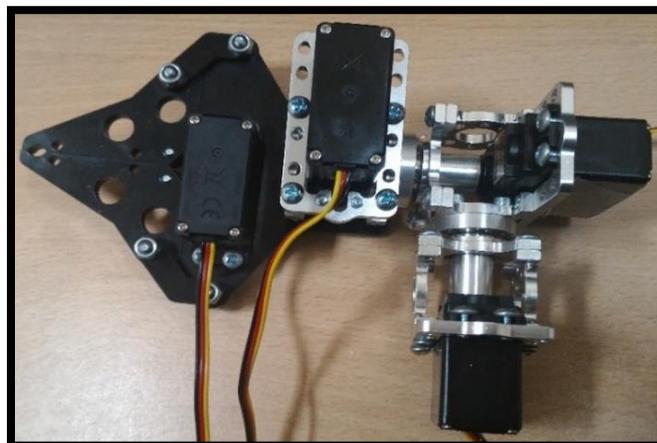
Unimos este acople spacer al channel de 7.62 cm de la articulación del codo y finalmente mediante el quad hub mount 90° tipo C que está en el engrane del servo gearbox de la articulación del codo se ha unido al channel de 22.86 cm teniendo como resultado lo observado en la Figura 72.



**Figura 72 Ensamble codo**

### **3.7.3 Ensamble de la muñeca**

E acopla los tres ServoBlocks, en una disposición en la cual se genera tres grados de libertad y al último ServoBlock se ha acoplado el efector final, que es una pinza paralela, teniendo como resultado lo observado en la siguiente Figura 73.



**Figura 73 Ensamble muñeca**

### 3.7.4 Ensamble de la base robótica

Después de la soldadura en aluminio con TIG, entre el perfil rectangular y la placa de aluminio, se procederá a reforzarla con una plancha de madera en la base la cual es la que va a estar en contacto con el suelo. Además con ángulos tipo L se une mediante pernos el mismo perfil con la placa de aluminio, consiguiendo de esta manera dos métodos de sujeción. (Figura 74)



**Figura 74 Base reforzada**

Después de reforzar la base y encontrándose más estable se procede a montar sobre el perfil en la parte superior donde se une el brazo con nuestra estructura al round base teniendo como resultado lo siguiente.



**Figura 75 Acople round base**

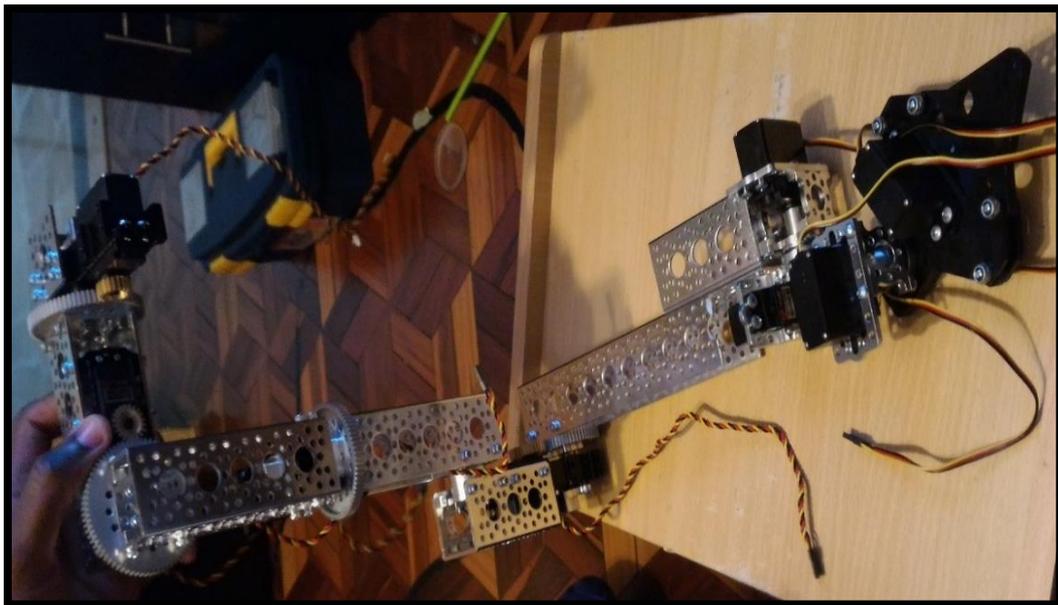
### 3.7.5 Ensamble final

Se acopla el hombro con el codo uniendo el acople spacer con el channel de la articulación 3 del hombro. (Figura 76)



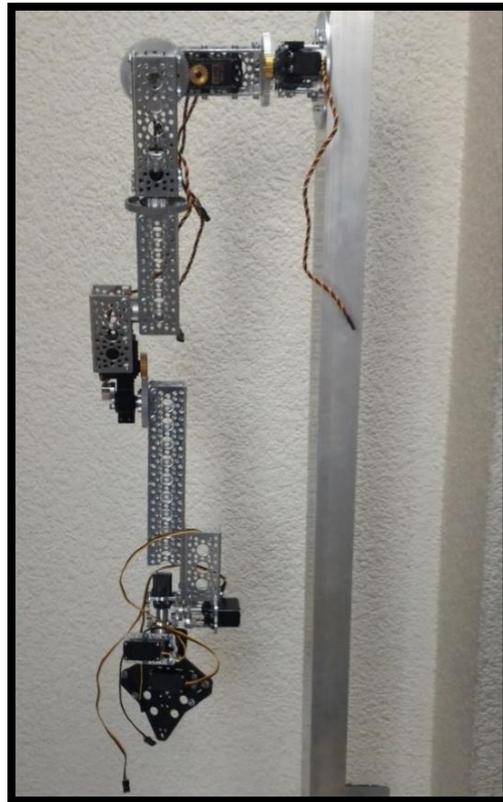
**Figura 76 Ensamble codo hombro**

Se procede a unir el ensamble hombro-codo con la muñeca teniendo como se observa en la Figura 77.



**Figura 77 Ensamble brazo**

Finalmente se acopla el brazo, en la disposición de un brazo derecho, a nuestra estructura base teniendo como resultado lo observado en la Figura 78.



**Figura 78 Brazo robótico**

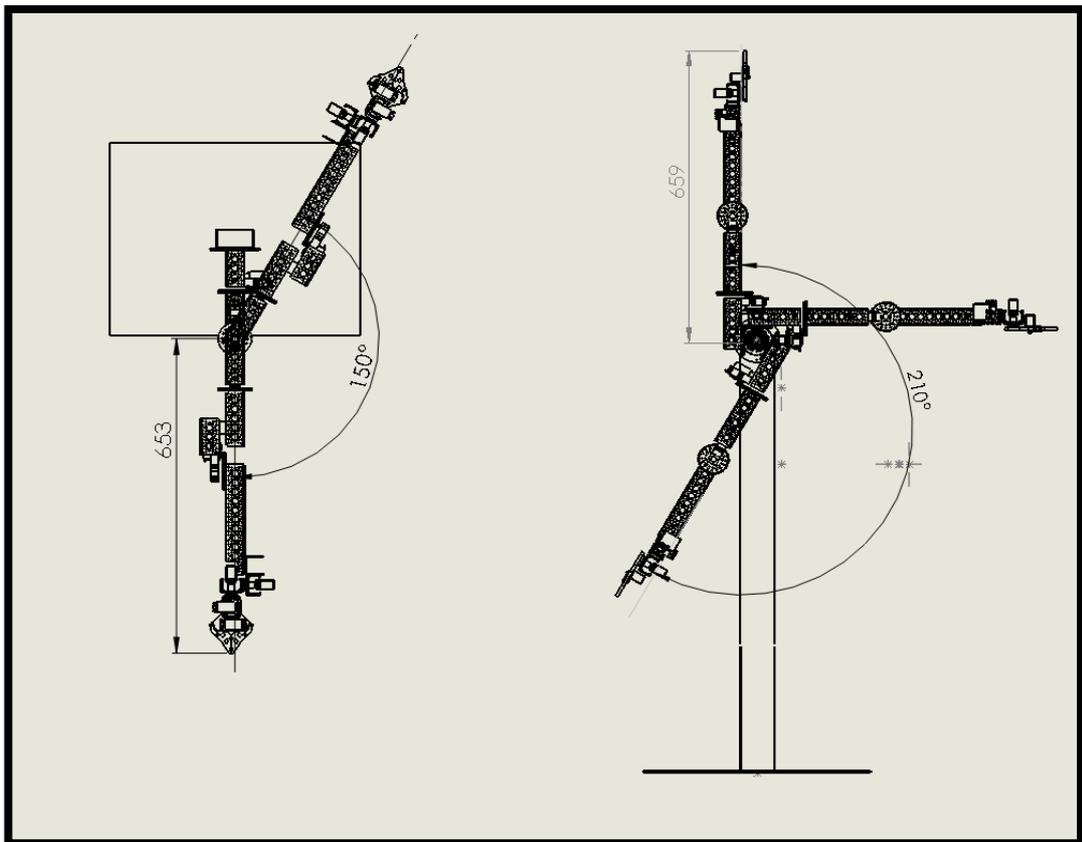
### **3.7.6 Posición Home**

Luego de realizar el ensamble final se procede a definir una posición de partida necesaria para algunas aplicaciones posteriores en el proyecto.

Se elige una posición natural de descanso de un brazo humano mientras este se encuentra de pie con las palmas de las manos hacia el cuerpo. Esta posición se puede considerar como una posición de reposo debido a la influencia de la gravedad y en el caso del funcionamiento con los servomotores energizados, estos generan un torque mínimo.

### 3.7.7 Zona de trabajo

Las dimensiones de los elementos del manipulador, junto a los grados de libertad, definen la zona de trabajo del robot. También queda restringida la zona de trabajo por los límites de giro y desplazamiento que existen en las articulaciones.



**Figura 79 Zona de trabajo**

Las dimensiones máximas del manipulador indican que se puede alcanzar hasta una altura máxima de 659 mm extendido verticalmente con un ángulo de giro de 210 grados y extendido horizontalmente tiene un alcance de 653 mm con un ángulo de giro de 150 grados tal y como se muestra en la Figura 79.

### 3.8 DISEÑO Y SELECCIÓN COMPONENTES ELECTRÓNICOS

Para el diseño y selección de elementos del sistema electrónico se consideró usar elementos comerciales de la plataforma SparkFun Electronics; que cumplen especificaciones técnicas principales de la matriz QFD como: PCB modular y Tarjeta electrónica para comunicación inalámbrica.

SparkFun Electronics es un tienda online electrónica con una gran variedad de partes y piezas para el desarrollo del proyecto; permitiendo desarrollar el sistema electrónico del brazo robótico 7 GDL de una forma más rápida, sencilla y poder acoplar; los controladores, los sensores IMU, baterías, PWM y el sensor Flex.

Los sensores que estarán en el operador serán lo más livianos y resistente posibles estarán montados en tres brazaletes tratando de ofrecer estabilidad, protección y comodidad para trabajar.

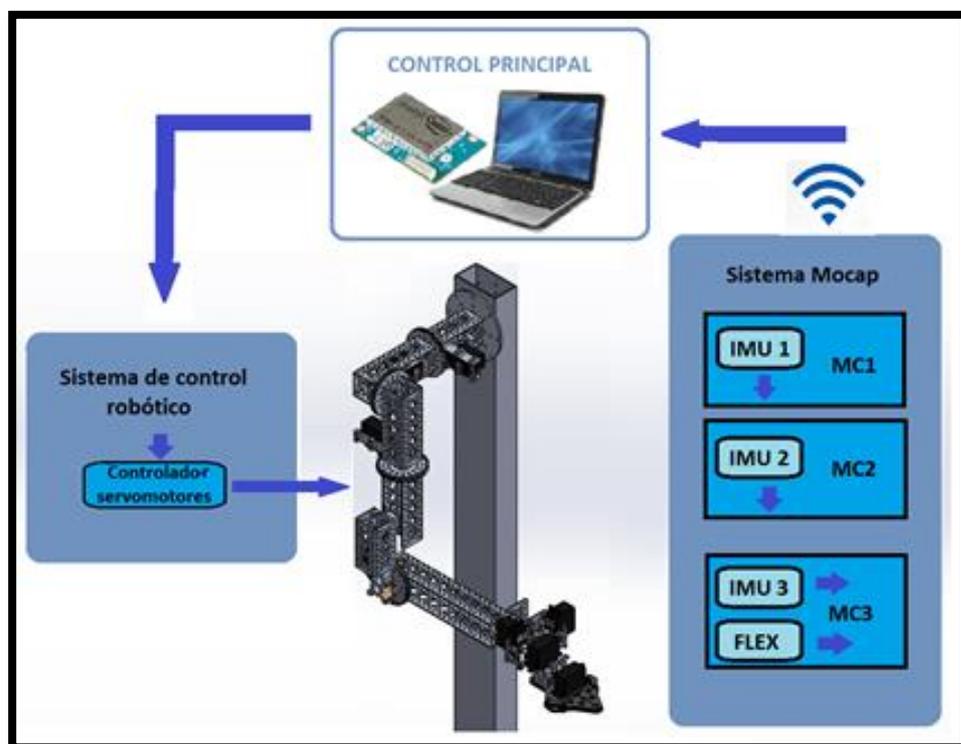


Figura 80 Sistema de control

### 3.8.1 Selección de sensores para Mocap

#### 3.8.1.1 Sensores IMU

El bloque IMU de Intel Edison usa el circuito integrado LSM9DS0 9DOF IMU. Es un sensor estándar según el fabricante que se fundamenta internamente con un giroscopio, un acelerómetro y magnetómetro cada uno con 3 GDL respectivamente, dando en total de 9 GDL que serán los que envíen la señal que tendrá que acondicionarse para controlar a cada actuador.

El uso del circuito integrado LSM9DS0 9DOF satisface la especificación técnica de la matriz QFD para otorgar a la unidad sensorial las características de compacto y liviano ubicadas en un nivel de prioridad cuatro en la matriz QFD.

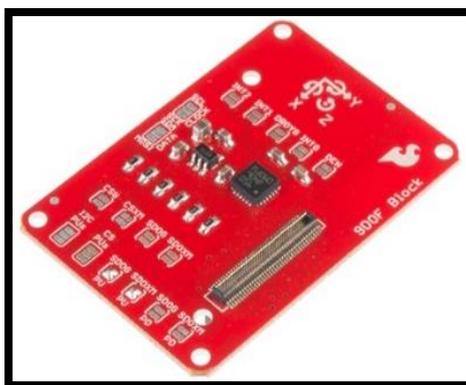


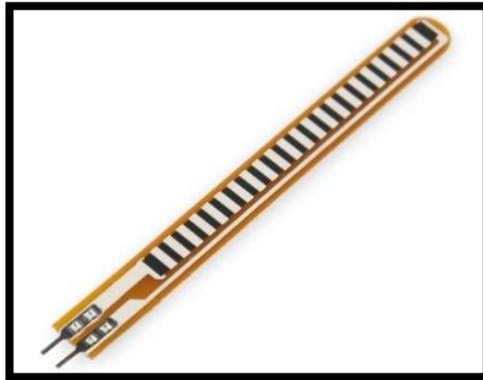
Figura 81 Intel Edison 9DOF IMU

Tabla 16  
Especificaciones IMU

Fabricante	SparkFun
Conexión	I <sup>2</sup> C (100KHz y 400 KHZ)
Acelerómetro	±2,4,6,8,0,16 g
Giroscopio	±245, 500, y 2000°/s
Magnetómetro	±2,4,6,8 o 12 gauss
Alimentación	5 VDC

### 3.8.1.2 Sensores FLEX

Es una resistencia variable que al ser flexionada cumple con la función de emitir la señal para cerrar y abrir la pinza paralela.



**Figura 82 Sensor Flex**

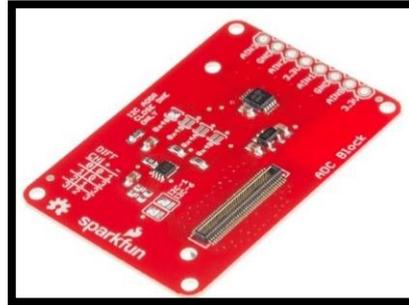
**Tabla 17**  
**Especificaciones sensor Flex**

Fabricante	Spectra Symbol
Ciclo de vida	>1 millon
Temperatura rango	-35°C A +80°C
Resistencia	25K Ohms
Rango de resistencia	45K a 125 K Ohms
Potencia de trabajo	0.5 Watts

### 3.8.2 Convertidor analógico digital

Este bloque añade la funcionalidad de ADC para el bus I<sup>2</sup>C de Intel Edison. El ADC ADS1015 de la marca TI proporciona un convertidor de 12 bits con un multiplexor analógico. Puede ser configurado como un dispositivo de terminación única de cuatro canales o como un dispositivo diferencial de dos canales.

El bloque ADC tiene puentes de soldadura para permitir la selección de la dirección del esclavo I<sup>2</sup>C entre cuatro opciones diferentes, lo que permite hasta cuatro de estas tarjetas para ser apilados bajo un mismo Intel Edison. Esta versión también añade una salida de 3,3 V a utilizar como una referencia de tensión.



**Figura 83 Intel Edison ADC block**

### 3.8.3 Adquisición de datos de sensores

Para la adquisición de los datos se ha utilizado el procesador Intel Edison; es un procesador Atom con doble núcleo, 500MHz CPU x86, con el apoyo de 1 GB de RAM, 4 GB de flash y lo más importante de todo Wi-Fi integrado y Bluetooth. Viene pre-instalado con una distribución yocto Linux y con la facilidad de acoplarse a los demás componentes electrónicos mediante comunicación I<sup>2</sup>C y adicional la posibilidad de ocupar bloques modulares desarrollados por SparkFun para ampliar su capacidad de funcionamiento.

Según las especificaciones técnicas de la matriz QFD como: PCB modulares, tarjeta electrónica para batería y tarjeta electrónica para comunicación inalámbrica, el Intel Edison cumple satisfactoriamente estos requerimientos de diseño.

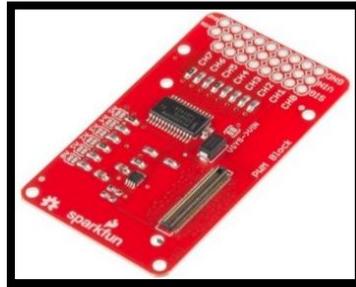


**Figura 84 Intel Edison**

### 3.8.4 Controladores de potencia para actuadores

Para controlar a los servos se ha optado por utilizar un complemento para Intel Edison, llamado PWM block de SparkFun Electronics que mediante el controlador emitirá las señales PWM para el movimiento de cada uno de

los actuadores. El bloque PWM de Intel Edison usa el circuito integrado PCA9685 que añade 8 canales de 12-bit para el control de los servos.



**Figura 85 Intel Edison PWM**

### 3.8.5 Bloque Base

El bloque base sirve como complemento para el Intel® Edison por lo que le permite conectar diferentes periféricos como un teclado, ratón o una unidad lectora de pulgar. Básicamente cualquier periférico que se puede conectar a un puerto USB. Se puede conectarse al Intel Edison a través de un puerto micro USB AB respaldado por otro USB OTG.



**Figura 86 Intel Edison Base Block**

## 3.9 FUENTE DE ALIMENTACIÓN ELÉCTRICA

Para los requerimientos de alimentación eléctrica del robot se han definido tres tipos de alimentación.

### 3.9.1 Fuente AC

Se necesita una toma de alimentación de 110 AC para energizar: un Router Wifi, necesario para la comunicación inalámbrica del robot; un

adaptador de voltaje, necesario para el funcionamiento del controlador principal; el circuito de mando ON/OFF y paro de emergencia.

### 3.9.2 Fuente de alimentación para servomotores

Se escogió para la alimentación de los servomotores Hitec una fuente de corriente de 30 A y 7.4 VDC, de acuerdo a la corriente que consumen los motores en trabajo continuo, funcionando simultáneamente de acuerdo a la Tabla 18.

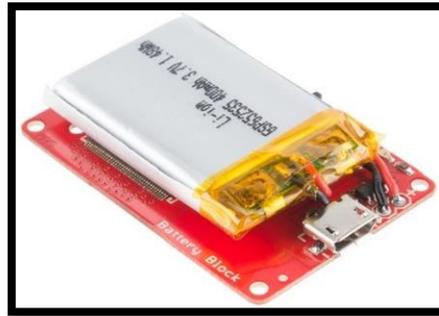
**Tabla 18**  
**Potencias de servomotores**

	Voltaje [VDC]	Corriente [A]		Potencia consumida [W]	
		Sin carga	Con carga	Sin carga	Con carga
<b>Servo 1</b>	7,40	0,24	3,00	1,78	22,20
<b>Servo 2</b>	7,40	0,24	3,00	1,78	22,20
<b>Servo 3</b>	7,40	0,24	3,00	1,78	22,20
<b>Servo 4</b>	7,40	0,24	3,00	1,78	22,20
<b>Servo 5</b>	7,40	0,19	1,40	1,41	10,36
<b>Servo 6</b>	7,40	0,19	1,40	1,41	10,36
<b>Servo 7</b>	7,40	0,19	1,40	1,41	10,36
<b>Sumatoria</b>		1,53	16,20	11,32	119,88

La fuente elegida tiene voltaje nominal fijo de 7.4 VDC desarrollada para este tipo de aplicaciones. Su potencia necesaria para el robot es de 200 W de acuerdo con las especificaciones del fabricante, considerando una eficiencia baja de 0.75 lo que suministraría en total son 150 W prácticos, que encajan con el requerimiento de los siete servomotores señalados anteriormente, que consumen en total 120 W. Finalmente se obtiene un coeficiente de seguridad de 1.25.

### 3.9.3 Fuente para sensores Mocap

Como el equipo Mocap es totalmente inalámbrico se optó por ocupar un KIT de Intel Edison, llamado Battery block de SparkFun Electronics que permitirá alimentar a todos los elementos mediante una batería de una celda de 400 mAh Li-ion.



**Figura 87 Intel Edison batería**

### **3.10 DISEÑO DEL SISTEMA DEL BRAZO ROBÓTICO**

En este apartado se procederá a diseñar en detalle la menara en que interactúan cada uno de los elementos necesarios para el funcionamiento del robot. Por lo que se definirá una arquitectura general del sistema de control, así como las diferentes interfaces de comunicación y el software necesario para el funcionamiento junto con su programación.

#### **3.10.1 Arquitectura del sistema robótico**

Primero se debe definir la manera en que los distintos dispositivos se comunicaran entre sí, es decir su interfaz de comunicación debe estar acorde al requerimiento en cada una de las distintas etapas.

Se requieren 3 bloques independientes para cada sensor IMU necesarios para cubrir todo el rango de movimiento del brazo humano. Estos bloques se han denominado como “Unidad Inercial”. La primera y la segunda son idénticas, mientras que la tercera es semejante a las dos primeras con la diferencia de que se debe agregar un sensor Flex resistivo, así como un conversor analógico digital para poder adquirir esta señal.

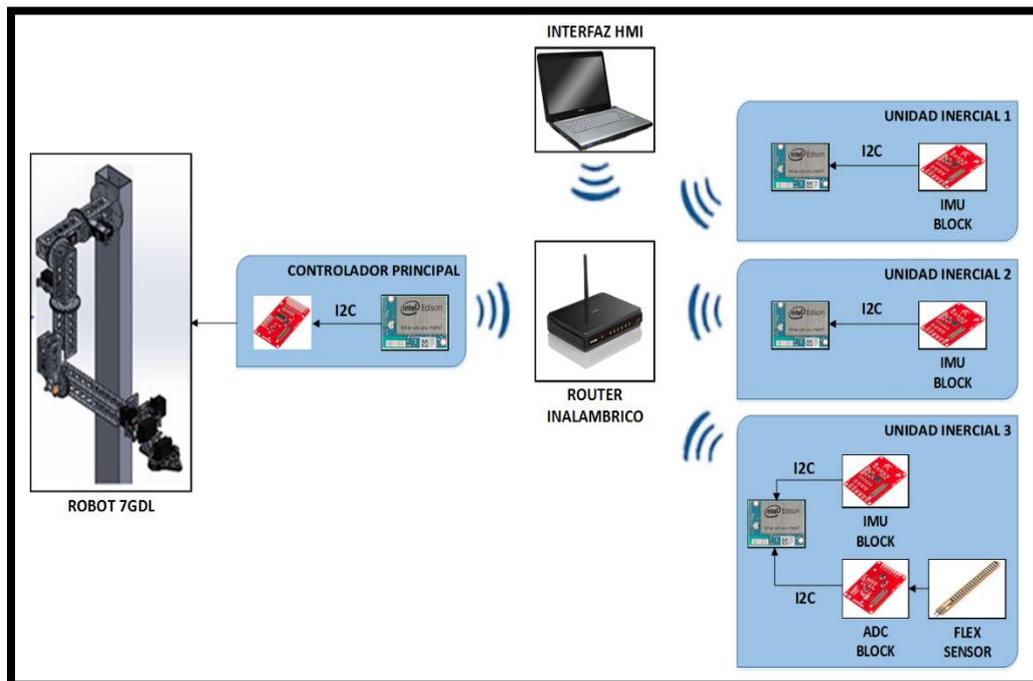
Se busca realizar el control del sistema robótico mediante sensores ubicados en la extremidad superior de una persona, los mismos que enviaran información a sus respectivos controladores mediante comunicación I<sup>2</sup>C.

Posteriormente el controlador de cada unidad inercial envía esta información a través de tecnología inalámbrica Wifi, al controlador principal.

El controlador principal se encarga de realizar una función de correspondencia entre los datos obtenidos de las unidades inerciales y la señal de control PWM enviada a cada uno de los servomotores. El control de la señal PWM se realiza mediante el bloque controlador PWM que se comunica con el Intel Edison utilizando comunicación I<sup>2</sup>C.

Se ha integrado para visualización, monitoreo y control del robot una interfaz gráfica de comunicación humano - máquina la cual funciona desde un ordenador que posea una tarjeta de red inalámbrica Wifi.

A continuación en la Figura 88 Arquitectura general Figura 88 se observa la arquitectura general de sistema robótico descrito anteriormente.



**Figura 88 Arquitectura general**

### 3.10.2 Unidades inerciales

Las unidades inerciales están compuestas principalmente por tarjetas electrónicas que cumplen una función específica y que se conectan entre sí mediante un puerto de expansión de 70 pines macho y hembra en el anverso y reverso respectivamente, esto permite apilar cada una de estas tarjetas

electrónicas de SparkFun-Intel Edison para formar un bloque como se observa en la Figura 89.



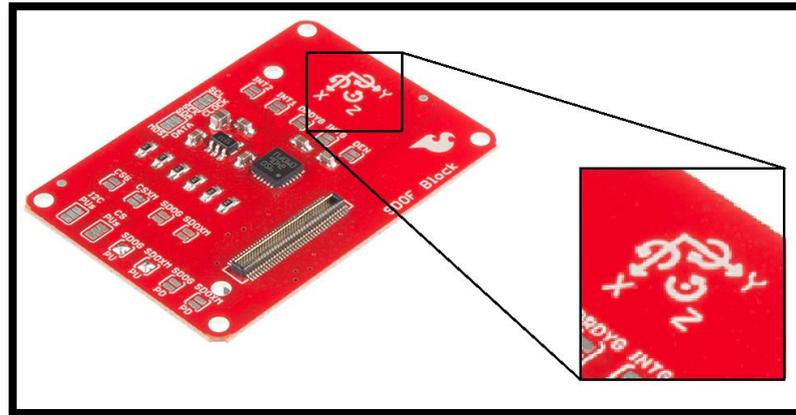
**Figura 89 Bloques para unidad inercial**

La unidad inercial 1 y 2 está conformada por las tarjetas Battery Block y 9DOF Block. Mientras que la unidad inercial 3 está conformada por los dos anteriores y adicional la tarjeta ADC Block. (Figura 90)



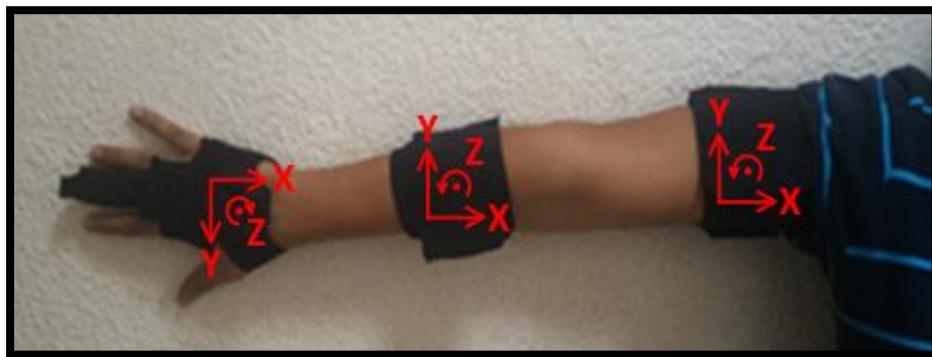
**Figura 90 Unidad inercial 3**

De acuerdo a la ubicación del circuito integrado del sensor LSM9DS0 se indica el sistema de coordenadas de referencia en la tarjeta electrónica 9DOF Block tal como se indica en la Figura 91.



**Figura 91 Sistema de referencia unidad inercial**

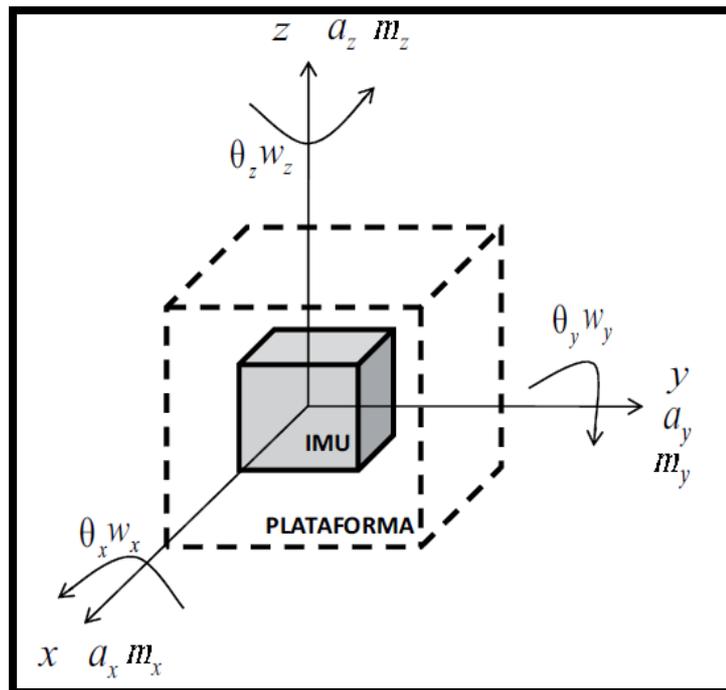
Este sistema de referencia se lo debe colocar en una disposición fija de tal manera que se pueda desarrollar las ecuaciones de correspondencia entre la orientación del sensor y la orientación de los eslabones del brazo robótico. En la Figura 92 se observa la disposición de los sensores inerciales de acuerdo a la posición del brazo indicado.



**Figura 92 Sistema de referencia en Brazo**

### 3.10.3 Fusión sensorial para unidad de medición inercial IMU

Es importante recordar cuáles son las principales variables de interés que se pueden obtener de una unidad inercial. Como se observa en la Figura 93 se busca encontrar las variables de: inclinación ( $\theta_x$ ,  $\theta_y$ ), orientación ( $\theta_z$ ), velocidad angular ( $\omega_x$ ,  $\omega_y$ ,  $\omega_z$ ), aceleración lineal ( $a_x$ ,  $a_y$ ,  $a_z$ ) y campo magnético ( $m_x$ ,  $m_y$ ,  $m_z$ ).

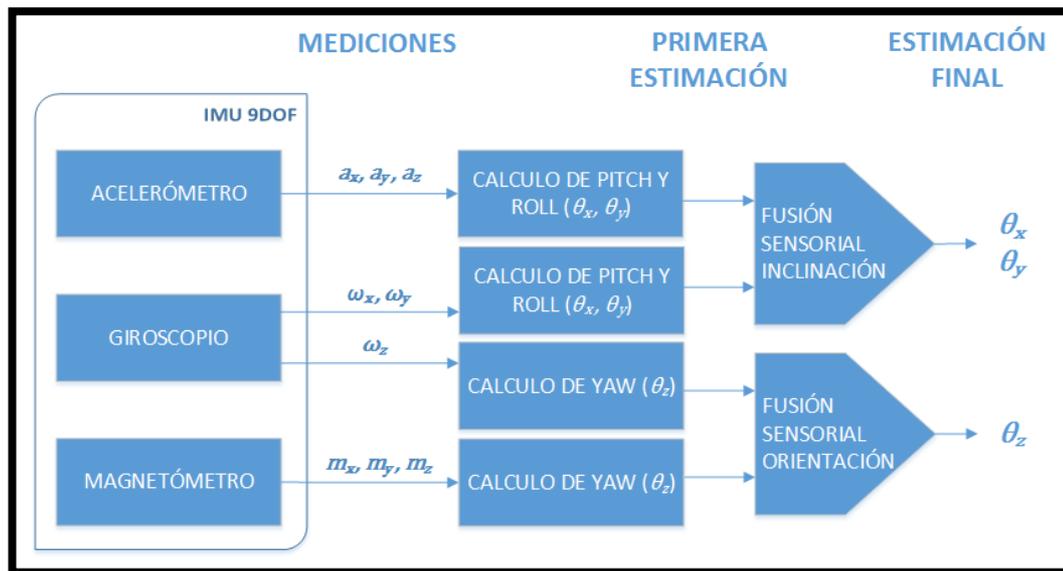


**Figura 93 Principales variables a obtener de un sensor IMU.**  
 Obtenido de: (Vigouroux Cavolina, 2010)

De las variables de interés mencionadas anteriormente, algunas pueden ser medidas en forma directa mientras otras deben ser estimadas a partir de las mediciones disponibles, lo que se conoce como mediciones indirectas. Por ejemplo, el sensor IMU de 9 GDL permiten medir la velocidad angular ( $\omega_x, \omega_y, \omega_z$ ), aceleración lineal ( $a_x, a_y, a_z$ ) y campo magnético del sensor en forma directa ( $m_x, m_y, m_z$ ). Por otro lado, la inclinación y orientación deben ser estimadas a partir de las mediciones disponibles.

También se pueden estimar variables como la velocidad lineal y la posición en el espacio del sensor, pero éstas variables no son necesarias para la aplicación del presente proyecto.

Gracias a las mediciones directas ya mencionadas se puede estimar con bastante precisión las variables de inclinación de la plataforma respecto de los ejes Roll y Pitch y la estimación de la orientación en el eje Yaw, incluso si no se dispone de un magnetómetro para corregir los errores a largo plazo de los giroscopios. En la Figura 94 se muestra el proceso de fusión.



**Figura 94 Proceso de fusión sensorial**

Se puede observar que si se tuviera únicamente un acelerómetro es posible obtener una estimación de Roll y Pitch y así mismo si se contara únicamente con un giroscopio, aunque en el caso del giroscopio se podría hacer también una estimación de Yaw. Y por último si se contara únicamente con un magnetómetro se podría realizar la misma estimación para Yaw

Se utilizan distintos sensores que aparentemente generan los mismos valores, es la con el fin de dar proceso a la fusión sensorial. Y se debe principalmente al comportamiento que cada uno de estos tiene, frente a condiciones de corto y largo plazo. De esta forma la fusión sensorial utilizar las mejores características de cada uno de los sensores de acuerdo a diferentes situaciones y condiciones de corto y largo plazo.

El acelerómetro mide la aceleración lineal en los 3 ejes xyz provocadas por el movimiento del sensor, pero cuando se encuentra en estado de reposo mide la aceleración producida por el campo gravitacional. Gracias a la medición del campo gravitacional se puede realizar una estimación de la inclinación del sensor utilizando trigonometría como por ejemplo con las siguientes ecuaciones:

$$\theta_y = \operatorname{atan}\left(\frac{a_x}{\sqrt{a_y^2 + a_z^2}}\right)$$

$$\theta_x = \operatorname{atan}\left(\frac{a_y}{\sqrt{a_x^2 + a_z^2}}\right)$$

Si se quiere medir únicamente la aceleración provocada por la gravedad, el mantener en constante movimiento el sensor, crearía un error bastante significativo en esta medición ya que el sensor detecta cualquier tipo de aceleración a la que el sensor se someta, y en conclusión se puede deducir que el acelerómetro genera una medición fiable únicamente en estado estable y no en estado transitorio.

En el caso del giroscopio, este puede realizar la estimación tanto de la inclinación como de la orientación a partir de la integración de la velocidad angular ( $\omega_x$ ,  $\omega_y$ ,  $\omega_z$ ) como se indica en las siguientes ecuaciones.

$$\theta_x(t) = \int_0^t \omega_x dt + \theta_x |_{t=0}$$

$$\theta_y(t) = \int_0^t \omega_y dt + \theta_y |_{t=0}$$

$$\theta_z(t) = \int_0^t \omega_z dt + \theta_z |_{t=0}$$

El problema de utilizar esta estimación está en el hecho de que se debe proporcionar la posición angular inicial para que en referencia a esta se encuentre la posición angular relativa. Esto funciona bastante bien para estados transitorios o estados de corto plazo, ya que a largo plazo la acumulación del error produciría una desviación de acuerdo al punto de inicio ingresado al principio.

En conclusión el acelerómetro funciona mejor a largo plazo mientras que el giroscopio funciona mejor a corto plazo, entonces es posible realizar la

fusión sensorial entre los dos para que la desviación que sufre el giroscopio en largo plazo sea corregida por el acelerómetro y de igual manera el giroscopio corrija los datos del acelerómetro, pero en corto plazo. De esa manera se logra una estimación final de la posición angular mucho más precisa que la estimación que podría realizar cada sensor individualmente.

De manera similar sucede entre la estimación de la orientación en el eje Yaw por parte del giroscopio, el cual debe ser corregido a largo plazo por el magnetómetro en la estimación final.

Por otro lado, uno de los mayores inconvenientes cuando se usa la representación de la inclinación y orientación mediante RPY (roll, pitch y yaw) es que, existe una singularidad cuando el ángulo Pitch es de noventa grados ( $\theta_x = 90^\circ$ ). Esto se debe al uso de funciones trigonométricas como la función arco tangente la cual tiene esta singularidad. Sin embargo, tomando como ejemplo la tarea de mantener un helicóptero en vuelo estacionario o en régimen de movimiento simple (sin vuelos acrobáticos), se puede asumir que dicha condición nunca se cumple.

En casos más exigentes, como vuelos acrobáticos, o como es el caso de nuestro robot humanoide, donde se necesita un amplio rango de rotación en el espacio, es recomendable utilizar una notación alternativa basada en cuaterniones.

Los cuaterniones proporcionan una notación matemática para representar las orientaciones y las rotaciones de objetos en tres dimensiones. Comparados con los ángulos de Euler o los ángulos RPY, son más simples de componer y evitan el problema del bloqueo de cardán (Gimbal Lock). Comparados con las matrices de rotación, son más eficientes y más estables numéricamente. Los cuaterniones son útiles en aplicaciones de gráficos por computadora, robótica, navegación y mecánica orbital de satélites.

### **3.10.4 Filtro complementario basado en cuaterniones**

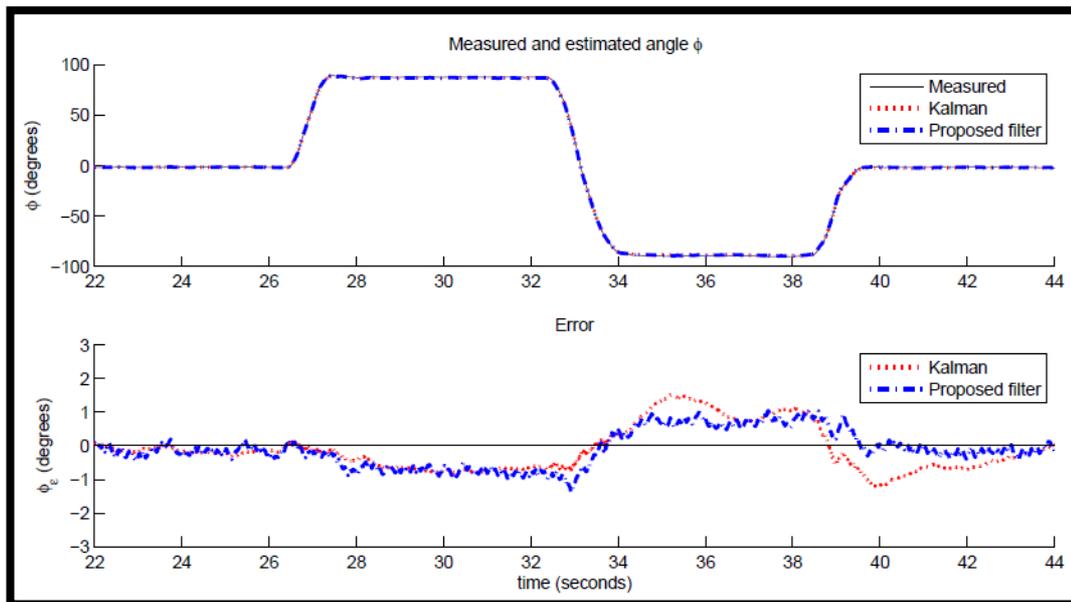
Los dispositivos electrónicos suelen tener dos principales problemas, el ruido y el error. Para disminuir el error en estado transitorio y en estado estable del sensor IMU se ha visto necesario realizar la fusión sensorial descrita en el apartado anterior. Pero adicional a esto se debe tratar de disminuir el problema de ruido causado por interferencias de cualquier índole. Y para esto se ha visto necesario la implementación de un filtro, el cual se encargará de disminuir el problema de ruido en la medición.

Hoy en día para resolver este problema en aplicaciones con sensores IMU, se usan comúnmente 3 tipos de filtros: filtro Kalman, filtro Madgwick, filtro complementario y filtro complementario basado en cuaterniones.

También se ha tomado en cuenta el requerimiento de la representación de orientación en el espacio mediante cuaterniones, por lo que se ha escogido como punto de inicio dos filtros similares: el filtro Madgwick el cual está basado en cuaterniones y la versión de un filtro complementario también basado en cuaterniones. Tanto el filtro Madgwick, desarrollado por Madgwick, S. en el 2010, como el filtro complementario basado en cuaterniones, desarrollado por Valenti, Dryanovski y Xiao en el 2015, son filtros optimizados para sensores IMU, mientras que el filtro Kalman, desarrollado por Kalman, R. en 1960 es de uso más amplio, usado en campos como navegación autónoma y asistida, en rastreo de misiles, en economía, procesamiento de señales, etc.

#### **3.10.4.1 Comparación filtro Madgwick**

Se comenzará analizando el desempeño del filtro Madgwick, para lo cual se analizan los resultados obtenidos del trabajo de Madgwick (Madgwick, S., 2010). En la Figura 95 se puede observar el resultado de la comparación para la variable Pitch, tanto del filtro Kalman como del filtro Madgwick, en el grafico superior. Y en el gráfico inferior se observa el error de la medición.



**Figura 95 Resultados de valores estimados y medidos Pitch**  
**Fuente: (Madgwick, 2010)**

El resultado para la variable Roll y Yaw son muy similares por lo que se continua analizando los datos de resumen final de las pruebas donde se puede observar los errores promedio final de cada filtro.

**Tabla 19**  
**Resultados de error promedio para Pitch, Roll y Yaw**

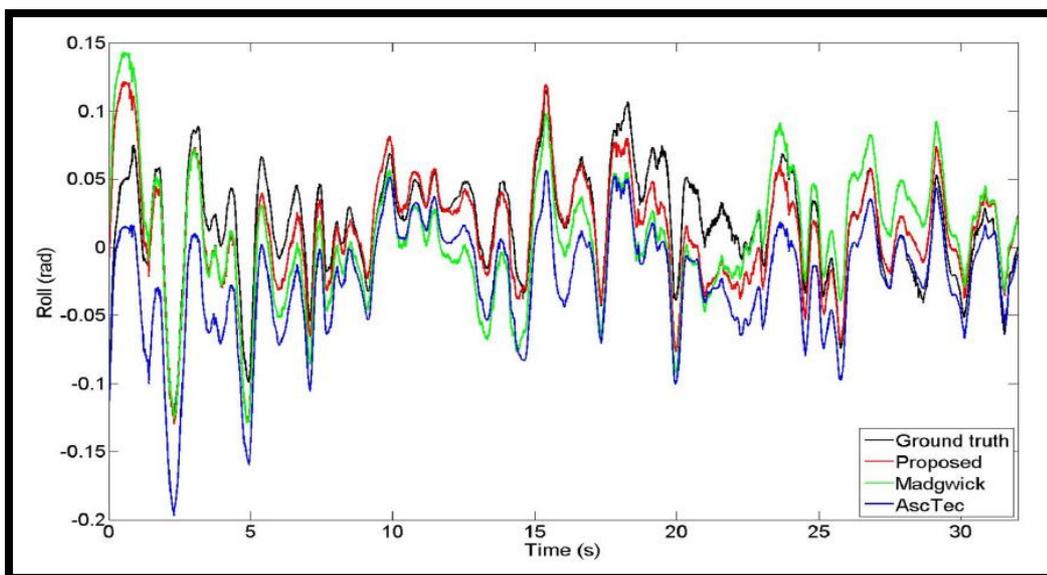
Euler parameter	Kalman-based algorithm	Proposed filter (MARG)	Proposed filter (IMU)
RMS[ $\phi_e$ ] static	0.789°	0.581°	0.594°
RMS[ $\phi_e$ ] dynamic	0.769°	0.625°	0.623°
RMS[ $\theta_e$ ] static	0.819°	0.502°	0.497°
RMS[ $\theta_e$ ] dynamic	0.847°	0.668°	0.668°
RMS[ $\psi_e$ ] static	1.150°	1.073°	N/A
RMS[ $\psi_e$ ] dynamic	1.344°	1.110°	N/A

**Fuente: (Madgwick, 2010)**

En los resultados se puede observar que el error calculado en las estimaciones del filtro Madgwick es menor al error causado por el filtro Kalman por lo que se concluye que el mejor filtro entre los dos y más eficiente para la aplicación del sensor IMU de 9 GDL o MARG es el filtro Madgwick.

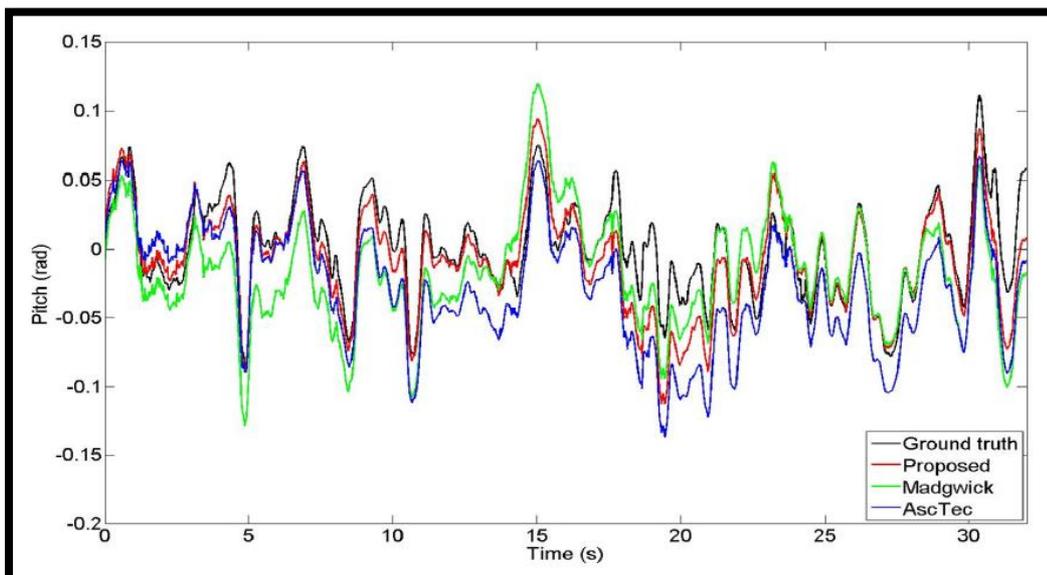
### 3.10.4.2 Comparación filtro complementario basado en cuaterniones

Finalmente se analiza el desempeño del filtro complementario basado en cuaterniones en comparación principalmente con el filtro Madgwick, por lo que se observa: la Figura 96, Figura 97 y Figura 98 (Valenti, Dryanovski y Xiao, 2015).



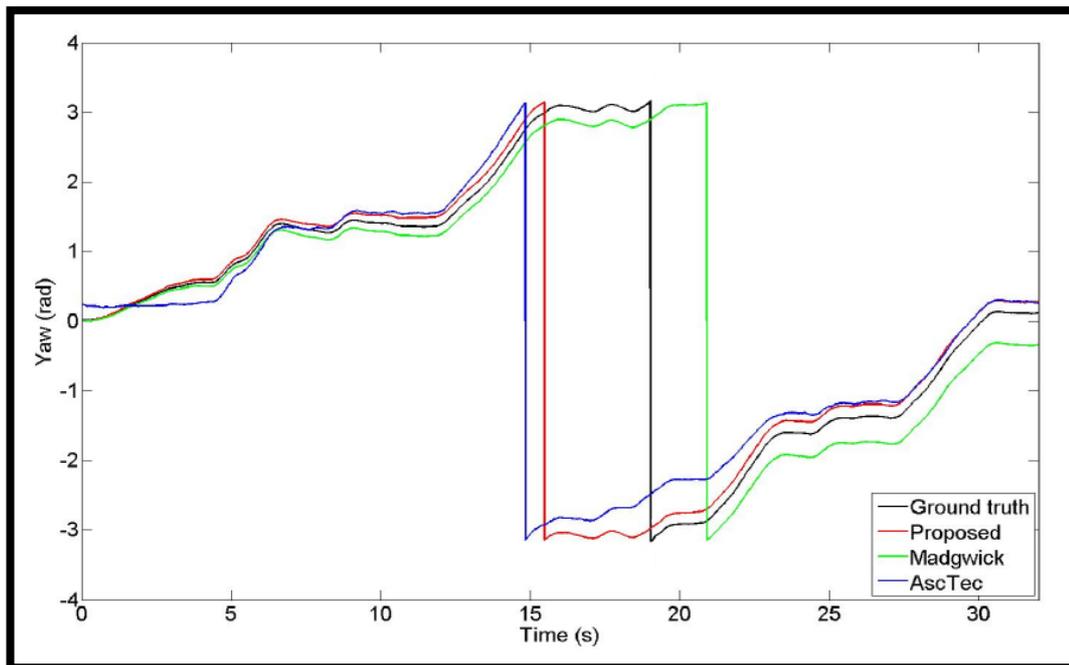
**Figura 96 Comparación de medición para Roll**

Fuente: (Valenti, Dryanovski, & Xiao, 2015)



**Figura 97 Comparación de medición para Pitch**

Fuente: (Valenti, Dryanovski, & Xiao, 2015)



**Figura 98 Comparación de medición para Yaw**

Fuente: (Valenti, Dryanovski, & Xiao, 2015)

Como se ha observado gráficamente, en la comparación para Roll, Pitch y Yaw, el filtro complementario basado en cuaterniones resulta ser más exacto y de mejor desempeño en comparación con el filtro Madgwick por lo que se elige este como el filtro a ser implementado en la adquisición de datos de los sensores IMU de 9 GDL.

Cabe destacar q el filtro complementario basado en cuaterniones al igual que el filtro Madgwick son computacionalmente más eficientes que el filtro Kalman, por lo que su implementación se ajusta para procesadores de bajas características computacionales.

### 3.10.4.3 Funcionamiento filtro complementario basado en cuaterniones

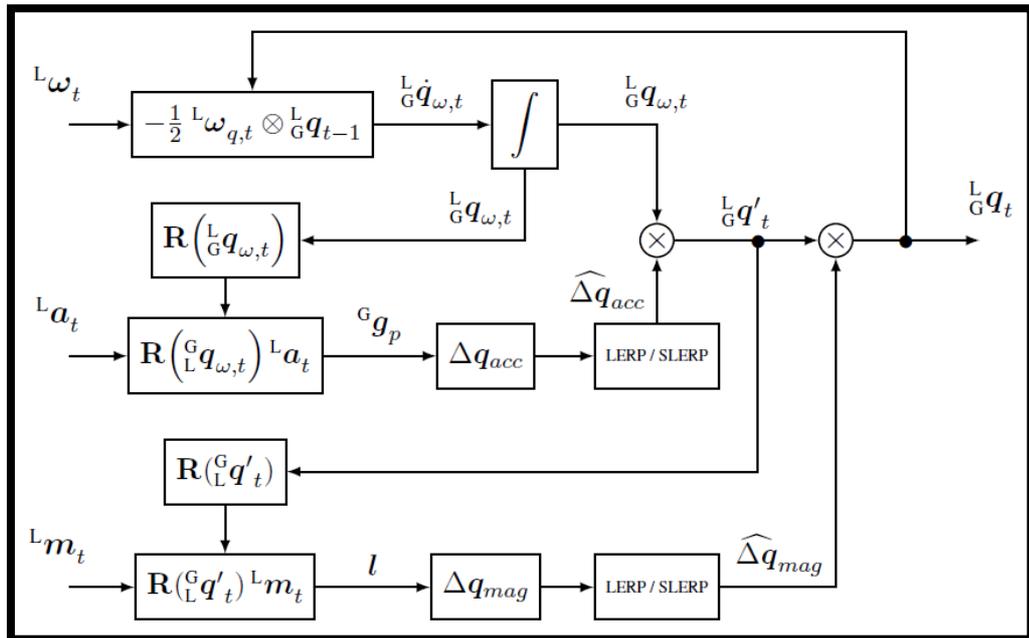
Un filtro complementario utiliza un análisis en el dominio de la frecuencia de las señales para combinarlas y obtener una mejor estimación de una cantidad determinada. Si una señal se ve afectada por ruidos con diferente frecuencia, dos filtros, con un ancho de banda adecuado, se puede aplicar de tal manera que la suma de las dos señales filtradas cubran todo el rango de frecuencias útiles.

Para la implementación del filtro en el caso de dispositivos IMU se utiliza preferentemente la versión basada en cuaterniones, debido a su mejoría en su carga computacional, la cual es más eficiente cuando se lo implementa en computadoras con capacidad de procesamiento limitado.

Para la estimación de la orientación de las lecturas del MIU, el filtro complementario basado en el trabajo de Valenti, Dryanovski y Xiao, realiza el filtrado paso altos de la orientación estimada a partir de los datos del giroscopio afectada por el ruido de baja frecuencia, y el filtrado paso bajos, en los datos del acelerómetro afectados por ruido de alta frecuencia. La fusión entre las dos estimaciones filtradas, puede obtener idealmente una estimación de la orientación, libre de ruidos. El término "complementario" se deriva del valor de la frecuencia de corte, que es el mismo para ambos filtros.

La estructura interna del filtro complementario utilizado se describe en la Figura 99. Fusiona la estimación de la orientación en forma de cuaternión de los datos del giroscopio, con los datos del acelerómetro en la forma de un cuaternión delta, que sirve como corrección sólo para componentes de alabeo y cabeceo (roll y pitch) de la orientación, manteniendo la estimación de la componente de guiñada (yaw) del giroscopio.

Si se proporcionan datos de un magnetómetro, el cual es nuestro caso de aplicación, un segundo paso se añade al algoritmo, donde un cuaternión delta, proveniente de lecturas del campo magnético, es derivado para corregir la componente de guiñada (yaw) de la estimación anterior, mediante la realización de una pequeña rotación alrededor del eje z absoluto, con el fin de alinear la orientación con el campo magnético terrestre.



**Figura 99 Filtro complementario usando magnetómetro**  
 Fuente: (Valenti, Dryanovski, & Xiao, 2015)

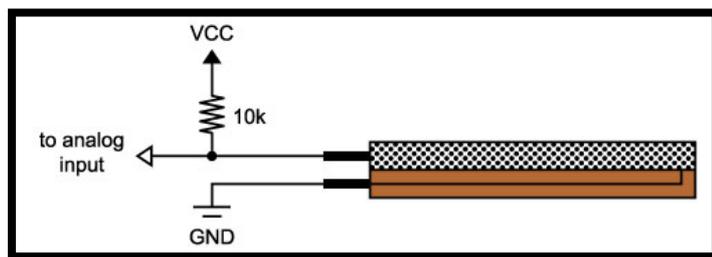
Si bien es cierto se utiliza el filtro complementario basado en cuaterniones para la estimación fusión y filtrado de la señal proveniente de los sensores IMU, su funcionamiento interno escapa del alcance del presente proyecto, por lo que se procederá más bien a entender su funcionamiento externo como si se tratase de un sistema cerrado. De esta manera se describirán los parámetros de configuración del filtro para poder utilizarlo como tal. El filtro tiene entradas y salidas de datos específicos ya predeterminados e implementados previamente y se lo puede encontrar como una librería q forma parte del sistema robótico ROS.

### 3.10.5 Sensor FLEX resistivo

El sensor Flex se lo ubicará para detectar la posición de mano abierta o mano cerrada que servirá para controlar la apertura de la pinza paralela. Este sensor podrá medir el grado de apertura de la mano y no solamente el estado de abierto o cerrado, de esta manera se consigue generar una mayor funcionalidad de la pinza. La utilidad de esto se encuentra en manipular objetos pequeños q se encuentren muy cerca entre sí, tratando de semejarse de alguna forma a la función de agarre de una mano humana.

Para realizar la lectura analógica del sensor Flex es necesario formar un circuito divisor de voltaje el cual se presenta en la Figura 100. La salida del divisor de voltaje se conecta a una entrada analógica en el ADC Block.

Se debe calibrar mediante software los valores máximos y mínimos para interpolar los valores intermedios, ya que el comportamiento del sensor es aproximadamente lineal.



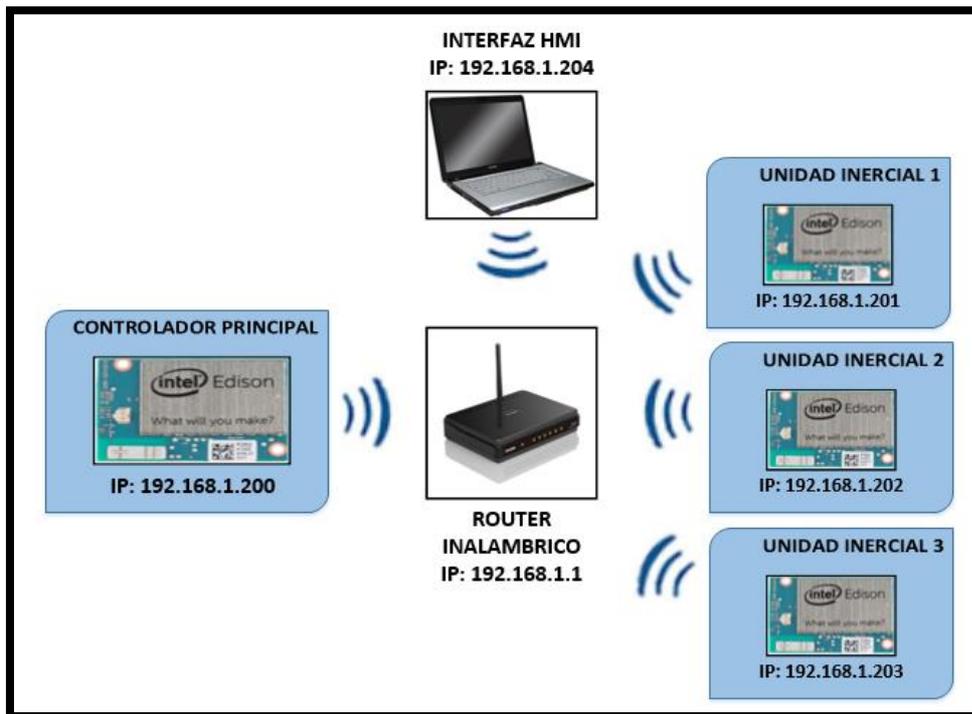
**Figura 100 Divisor de Voltaje**

De aquí la ecuación que define el voltaje de salida  $V_{out}$  definido por la resistencia de 10K Ohm y la resistencia del sensor Flex "R", se expresa de la siguiente forma:

$$V_{out} = \left( \frac{R}{R + 10K} \right) * VCC \quad \text{Donde } VCC = 3.3V$$

### 3.10.6 Topología de red inalámbrica

Se ha implementado una topología en infraestructura estrella que es la más utilizada en redes inalámbricas. De este modo todos los dispositivos se comunican entre sí, siempre a través de un dispositivo coordinador principal, de aquí el nombre característico de estrella al estar todos enlazados a un mismo dispositivo. A continuación se observa en la Figura 101 la topología de red junto con la asignación de direcciones IP de cada dispositivo.



**Figura 101 Topología de red**

Se asignan direcciones de IP fijas para poder configurar posteriormente la estructura de comunicación entre dispositivos dentro del sistema operativo ROS.

ROS es un entorno informático distribuido. Un sistema de ROS puede comprender decenas, incluso cientos de nodos, que se distribuyen a través de múltiples máquinas. Dependiendo de cómo esté configurado el sistema, cualquier nodo puede necesitar comunicarse con cualquier otro nodo, en cualquier momento.

Como resultado, ROS tiene ciertos requisitos de la configuración de red:

- Debe haber conectividad completa, bi-direccional entre todos los pares de máquinas, en todos los puertos.
- Cada máquina debe anunciarse por un nombre que todas las otras máquinas pueden resolver.

Para mayor facilidad en el manejo de las direcciones IP, en cada uno de los dispositivos se modifica el archivo Hosts el cual se encuentra en la dirección “/etc/hosts”. En este archivo se añaden las direcciones de los dispositivos junto con un nombre que sirva para ubicarlos de mejor manera. En la Tabla 20 se describen las líneas que se deben agregar en el archivo Hosts. Se debe tener en cuenta que cuando se modifica el archivo Hosts, se debe agregar la IP correspondiente al dispositivo que se está configurando y agregar su nombre en la línea designada con la IP 127.0.0.1 luego de la palabra localhost.

**Tabla 20**  
**Asignación de nombres en archivo Hosts**

ARCHIVO HOSTS	
192.168.1.200	motors
192.168.1.201	imu01
192.168.1.202	imu02
192.168.1.203	imu03
192.168.1.204	master

Luego de esto se deben correr dos líneas de código en la terminal para configurar la comunicación en el ambiente de ROS. El comando “export ROS\_HOSTNAME=imu\_01” se usa en el caso de la primera unidad inercial para designar el nombre de la máquina denominado como “HOSTNAME” como imu\_01. En el caso de las unidades inerciales 2 y 3 se deben ingresar su Hostname respectivamente.

El comando “export ROS\_MASTER\_URI=http://master:11311” se usa para todas las unidades inerciales como para la máquina cliente y sirve para designar la máquina que hará como master dentro de la configuración de ROS.

ROS necesita conocer el nombre de cada máquina que se está ejecutando. Esto se hace estableciendo la variable de entorno “ROS\_HOSTNAME” de cada máquina con su propio nombre. Además, se debe proporcionar ROS con el URI del nodo maestro, que se puso en marcha

por el comando `roscore`. Dado que en una configuración de ROS, debe haber un único nodo maestro, su URI debe replicarse en todas las máquinas mediante el establecimiento de la variable de entorno `ROS_MASTER_URI`.

La máquina designada como master es la encargada de coordinar toda la información que se envía de una máquina a otra, además el master siempre guarda el registro de todos los nodos que se están corriendo desde cada máquina, así como la lista de topics que se publican en el sistema ROS.

### **3.11 SOFTWARE DE CONTROL**

En este apartado se describe el funcionamiento de cada nodo dentro de la estructura del sistema ROS y como se comunican a través de sus respectivos topics. La interacción entre estos se puede observar en la Figura 102. Aquí se encuentra a breves rasgos la estructura grafica de la comunicación entre nodos a través de topics.

Dentro del ambiente de desarrollo de ROS existen dos opciones de lenguajes para la programación más usuales, lenguaje Python y lenguaje C++, siendo cada uno mejor en diferentes circunstancias. Por ejemplo Python se utiliza para desarrollar programas de una forma más fácil y sencilla ya que es un lenguaje interpretado que no necesita compilar, y por otro lado el lenguaje C++ si bien es cierto es más complejo de desarrollar, su eficiencia computacional es considerablemente de mucha mejor calidad, además de poder ser complementado con múltiples librerías adicionales de código abierto que aumentan su capacidad de aplicación prácticamente a cualquier tipo. Además de estas razones se destaca la preferencia del uso de este lenguaje en aplicaciones robóticas, ya que se necesita una excepcional velocidad de respuesta y cálculos complejos de alta eficiencia. Por lo expuesto anteriormente y ya que el proyecto requiere una ejecución en tiempo real del sistema de captura de movimiento, se desarrollan todos los programas con el uso del lenguaje C++.

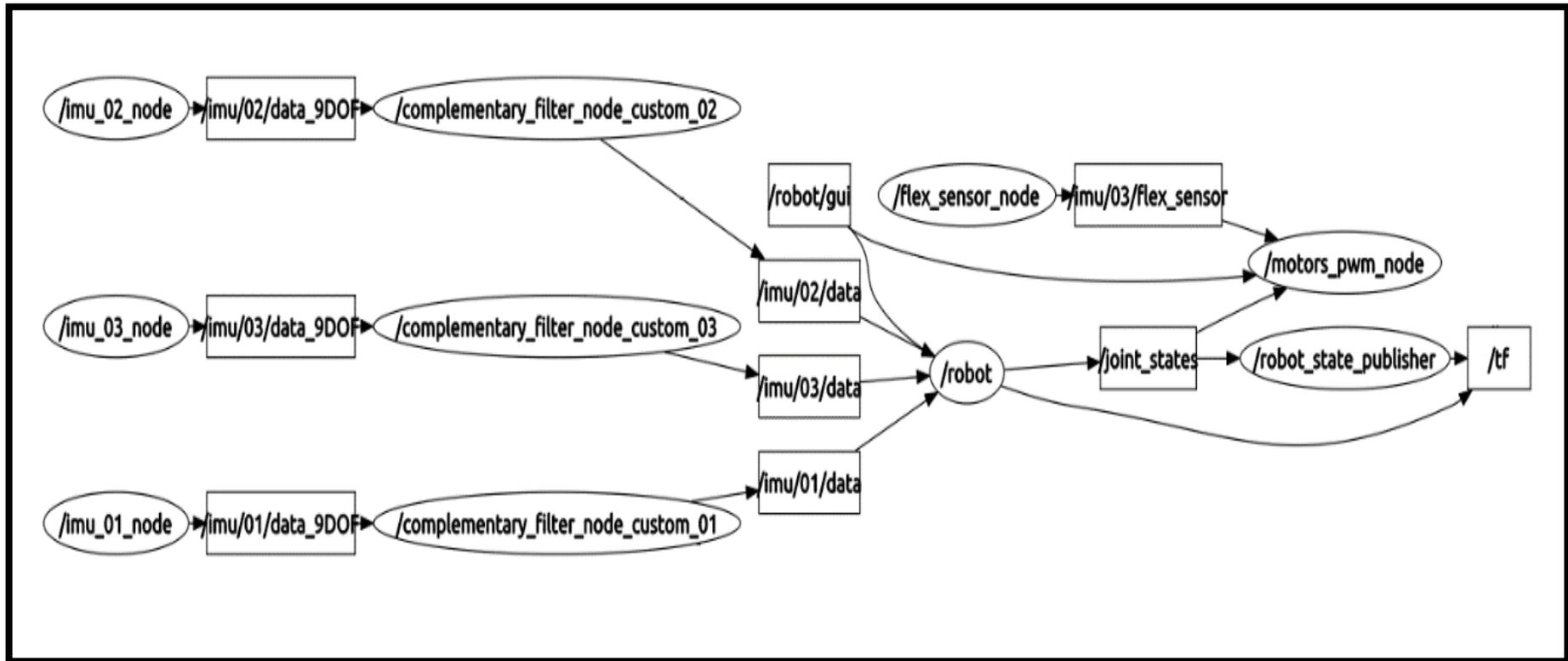
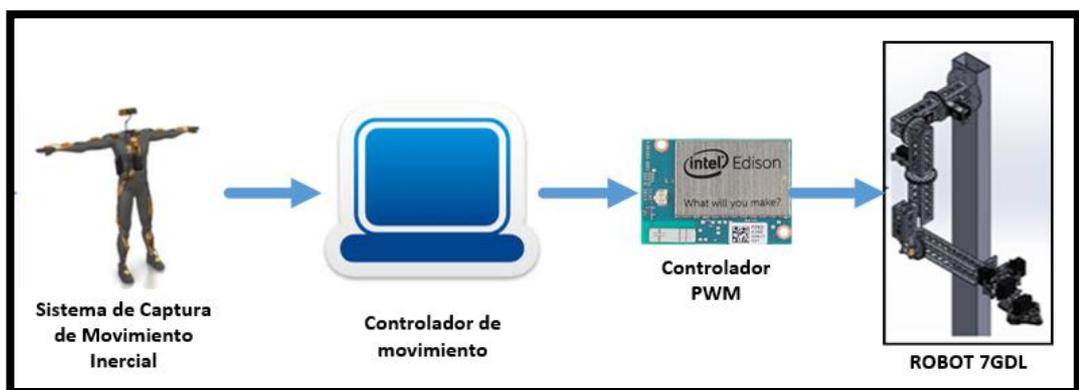


Figura 102 Estructura de nodos y topics del sistema ROS

### 3.11.1 Arquitectura de control

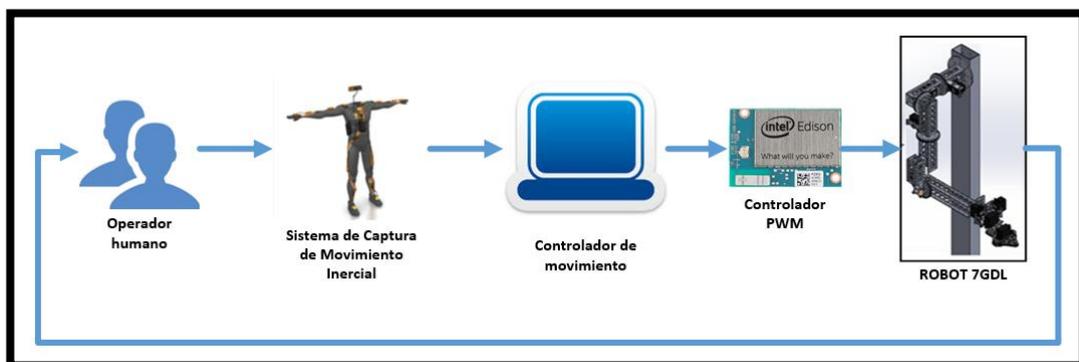
En la Figura 103 se observa la arquitectura de control en lazo abierto que se ha desarrollado en el presente proyecto. Es un lazo abierto ya que el sistema robótico no cuenta con sensores, que puedan realizar una retroalimentación del movimiento del robot hacia el controlador del movimiento. Al no saber el estado real del robot el controlador de movimiento, no realiza ningún tipo de corrección a la señal enviada.



**Figura 103 Arquitectura control de software**

Al contrario en un lazo cerrado esta señal se corrige de acuerdo a la retroalimentación de los sensores, el cual no es el caso del presente proyecto.

En teleoperación, la retroalimentación es dada por el mismo operador, el cual es el encargado de observar el estado real del robot y corregir la señal de acuerdo a su requerimiento. Este esquema de control si se considera como un lazo cerrado como se observa en la Figura 104.



**Figura 104 Arquitectura control de general**

Cabe destacar que dentro del sistema “ROBOT 7GDL” de la Figura 104 existe un control interno de posición, en lazo cerrado por parte de los servomotores. A pesar de esto en el diseño general de la arquitectura de control, se considera al servomotor como un sistema cerrado, el cual tiene una señal de entrada y salida de posición.

### 3.11.2 Adquisición de datos



**Figura 105 Algoritmo de adquisición de datos**

El primer nodo es el programa encargado de adquirir los datos que el circuito integrado LSM9DS0 almacena en sus registros. La lectura y escritura de los registros de CI se realizan mediante el uso de funciones

preestablecidas que se encuentran definidas en una librería proporcionada por el fabricante, en este caso, SparkFun. El diagrama de flujo que describe el algoritmo de adquisición de datos se observa en la Figura 105.

### **3.11.2.1 Configuración de rango de medición del sensor**

Como primer paso en el programa es necesario configurar los registros encargados de 2 funciones principales: la frecuencia de muestreo y el rango de medición. Al elegir el rango de medición del sensor se está eligiendo indirectamente su resolución.

Cada sensor cuenta con un registro de lectura de 16 bits, donde se tiene un bit para el signo y 15 bits para el valor, dando un rango de variación entre -32768 y 32768.

El rango de medición que se ha seleccionado realizando pruebas de funcionamiento. Estas pruebas consisten en los siguientes pasos:

1. Configurar el sensor con el menor rango de medición para la primera prueba.
2. Realizar movimientos de rotación en cada eje procurando alcanzar una velocidad aproximada de 90 grados por segundo (velocidad mínima que alcanzan los servomotores).
3. Realizar movimientos del brazo humano completando acciones como agarrar, mover y soltar objetos, manteniendo una velocidad natural acostumbrada.
4. Registrar los valores de salida del registro de 16 bits
5. Análisis de resultados.
6. Se vuelve a realizar el proceso aumentando en la siguiente iteración el siguiente rango de medición.

Se comienza en el menor rango de medición para tratar de conseguir la mejor resolución del sensor.

En el punto 5 se realiza el análisis verificando que los valores obtenidos no sobrepasen el rango de medición, es decir que los valores no lleguen hasta el valor máximo de 32768, sino que varíen proporcionalmente en todo el rango de medición. Si no se cumple esto significaría una pérdida significativa de información.

Por otro lado si los valores registrados no varían proporcionalmente dentro de todo el rango de medición de 0 a 32768, en un solo sentido, o de -32768 a 32768 en ambos sentidos; significaría una deficiencia en la resolución escogida para el sensor. Entre mayor sea el rango de medición escogido, menor será la apreciación o resolución de este.

En la Tabla 21 se señala los rangos de medición escogidos que mejor funcionalidad tienen para la aplicación y requerimiento de movimiento del robot.

**Tabla 21**  
**Rangos de medición**

	Rangos de medición	Rango de medición escogido	Resolución Calculada
<b>Acelerómetro [G]</b>	$\pm 2/\pm 4/\pm 6/\pm 8/\pm 16$	$\pm 2$	0,000061
<b>Giroscopio [DPS]</b>	$\pm 245/\pm 500/\pm 2000$	$\pm 2000$	0,061035
<b>Magnetómetro [GAUSS]</b>	$\pm 2/\pm 4/\pm 8/\pm 12$	$\pm 2$	0,000061

En el proceso de filtraje y estimación de la posición angular del sensor IMU, utilizando los datos de los 3 sensores integrados como se describirá más adelante, se puede validar los rangos escogidos de acuerdo a los siguientes requerimientos.

El acelerómetro se ocupa en estado estable para la estimación de la posición mientras que el giroscopio se ocupa en estado transitorio. Ya que los datos del acelerómetro servirán cuando está cerca de un estado de reposo, la única magnitud de entrada es la aceleración gravitacional de la tierra la cual equivale a 1 G, de aquí se puede observar que el rango de medición mínimo de

2G es suficiente y además mantiene la resolución máxima con un valor de 0.000061 G.

El rango de medición mínimo de 245 DPS para el giroscopio, sería suficiente de acuerdo a la velocidad a la que funcionan los motores de 90 DPS, pero ya que en el punto 3 de la prueba de funcionamiento se toma en cuenta los datos obtenidos en acciones de agarre o movimiento de objetos, se concluye que la velocidad a la que el brazo humano realiza este tipo de acciones cotidianas, es mayor a la que los motores alcanzan y por tanto el rango de medición de 245 DPS no es suficiente para detectarlo.

Gracias a los datos obtenidos, se determinó que el mejor rango de medición para el giroscopio, es el máximo que éste posee de 2000 DPS.

Por último para el rango de medición del magnetómetro se toma en cuenta el campo magnético terrestre el cual tiene una intensidad que varía entre 0,25-0,65 GAUSS siendo más intensa en los polos y menos intensa en la línea Ecuatorial. De acuerdo al requerimiento se determina que el rango de medición óptimo que se debe configurar para alcanzar la mejor resolución es de 2 GAUSS. Esto concuerda con las mediciones realizadas en las pruebas de funcionamiento.

Al analizar los requerimientos para el rango de medición de los 3 sensores independientes, se puede validar que los rangos escogidos gracias a las pruebas de funcionamientos han sido correctos.

### **3.11.2.2 Configuración de frecuencia de muestreo del sensor**

El programa contiene un bucle "while", el cual se encarga de repetir el proceso de lectura, cálculo de valores y publicación hasta que exista una señal de paro. El bucle tiene una frecuencia definida para publicar datos del sensor de 95 Hz. Este es el máximo valor de muestreo en el que pueden trabajar los 3 sensores integrados al mismo tiempo. Ya que el magnetómetro tiene una frecuencia de trabajo máxima de 100 Hz, se elige la frecuencia de trabajo más

cercana del giroscopio que es de 95 Hz y del acelerómetro de 100 Hz. Después de analizar las tres frecuencias a las que pueden trabajar se elige la menor de 95 Hz por ser la más lenta, es decir que el giroscopio es el último en actualizar su información.

Los datos de las frecuencias de trabajo disponibles de cada sensor y la frecuencia de trabajo elegida se indican a continuación en la Tabla 22. Cabe destacar que el protocolo de comunicación I<sup>2</sup>C en modo normal permite una frecuencia de comunicación de 100KHz por lo que los sensores transmitirán información sin problema utilizando este protocolo.

**Tabla 22**  
**Frecuencia de muestreo sensor IMU**

	Frecuencias de Muestreo [Hz]	Frecuencia Escogida [Hz]
<b>Acelerómetro</b>	3.125, 6.25, 12.5, 25, 50, 100, 200, 400, 800, 1600	100
<b>Giroscopio</b>	95, 190, 380, 760	95
<b>Magnetómetro</b>	3.125, 6.25, 12.5, 25, 50, 100	100

### 3.11.2.3 Lectura de valores

El programa se encarga de leer los valores generados por parte del magnetómetro, acelerómetro y giroscopio integrados en el chip. Existen dos funciones definidas en la librería que permiten realizar la lectura de manera sencilla, la diferencia entre las dos es que la primera devuelve un valor entre -32768 y 32768 que es el rango en que varía el registro de 16 bits que posee cada uno de los tres sensores que conforman el CI. Y por otro lado la segunda función devuelve un valor ya acondicionado a las unidades estándar del sensor: fuerza G, para el acelerómetro; grados por segundo, para el giroscopio y Gauss para el magnetómetro.

Leyendo en el registro de cada uno de los sensores un bit de “dato nuevo disponible” se puede sincronizar la lectura de los registros para que esta se realice únicamente cuando se encuentren los 3 datos disponibles.

#### **3.11.2.4 Conversión de unidades**

En este caso las unidades estándar que devuelve la función no son las necesarias para la entrada de valores que necesita el filtro posterior, por lo que se deben cambiar las unidades a:  $m/s^2$ , para el acelerómetro; radianes por segundo, para el giroscopio y en el caso del magnetómetro no es necesario el cambio de unidades ya que el filtro calcula el vector unitario adimensional del campo magnético con los datos enviados en cualquier unidad.

#### **3.11.2.5 Corrección de valores del magnetómetro**

El magnetómetro mide la intensidad y dirección de campos magnéticos. En realidad existen campos magnéticos invisibles alrededor de todas las cosas, y el sensor detecta cualquiera de estos campos, desde un imán hasta el campo magnético terrestre. El campo geomagnético está siempre en constante cambio debido a que depende de múltiples factores a corto y largo plazo, éste cambia en escalas de tiempo desde los milisegundos a millones de años. Las escalas temporales más reducidas vienen dadas a partir de los flujos en la ionosfera y la magnetosfera; alguno de estos cambios se puede hacer corresponder a tormentas geomagnéticas o variaciones diarias en las corrientes.

Por todo esto y gracias a las mediciones realizadas y pruebas de funcionamiento del sensor se ha visto prudente realizar un proceso de calibración. Adicional a esto se ha encontrado una interferencia importante en las mediciones del sensor provocadas por la corriente de las tarjetas electrónicas que conforman el bloque de la unidad inercial en su conjunto, especialmente influenciada por la tarjeta electrónica Battery Block, que se encarga de proporcionar la alimentación eléctrica a todo el bloque y del proceso de carga de la batería de ion-litio.

La calibración consiste en comparar los valores de campo magnético sin la tarjeta de la batería y luego con esta incorporada. De esta manera se puede encontrar una diferencia en la intensidad de campo de los tres ejes xyz.

Se puede asumir que esta diferencia de intensidad magnética considerada como interferencia, es de intensidad y dirección estable, ya que la fuente de este campo magnético se encuentra en una posición en el espacio relativamente fija a la posición del sensor.

Por último ya que es una desviación lineal fija, basta con encontrar el valor de desviación para realizar la corrección de los valores.

En éste caso para evitar extraer del bloque la tarjeta electrónica de la batería, se ha utilizado un sensor magnetómetro extra el cual servirá como referencia para realizar la calibración y eliminación de error por interferencia.

Para esta finalidad, se ha utilizado un sensor incorporado en un teléfono móvil inteligente con características descritas en la Tabla 23.

**Tabla 23**  
**Magnetómetro de referencia**

Descripción	
<b>Modelo</b>	PSH Magnetic field sensor
<b>Marca</b>	Intel Inc.
<b>Rango</b>	800 $\mu$ T / 8 GAUSS
<b>Resolución</b>	0.5 $\mu$ T / 0.005 GAUSS

Se toma el valor promedio de los datos del campo magnético en la orientación norte del sensor magnético de referencia y se compara con los datos obtenidos del magnetómetro de la unidad inercial. Los datos obtenidos se indican en la Tabla 24.

**Tabla 24**  
**Datos para calibración**

	Campo magnético [mGauss]		Valor 16bits		Diferencia
	Sensor Referencia	Sensor Inercial	Sensor Referencia A	Sensor Inercial B	A-B
<b>X</b>	0	100	0	1678	-1678
<b>Y</b>	-240	-90	-4089	-1570	-2519
<b>Z</b>	-100	-70	-1704	-1269	-435

Los valores encontrados de la diferencia son la desviación lineal del sensor por lo que se le deberá sumar este valor al dato obtenido de la lectura del sensor para cada uno de los ejes xyz.

### 3.11.2.6 Publicación de datos

Para publicar los datos obtenidos se debe crear un mensaje que contiene todas las variables q se van a transmitir en el mensaje. Al analizar los tipos de mensajes estándar de ROS, que se puede ocupar, existen dos tipos de mensajes que pueden ser de ayuda. El primero de tipo “sensor\_msgs/Imu” que contiene variables para velocidad angular y aceleración considera el uso de sensores Imu únicamente de 6 GDL, el cual no es el caso. Y el segundo de tipo “sensor\_msgs/MagneticField” que contiene variables para el campo magnético considera el uso independiente de un magnetómetro como para la aplicación de una brújula digital. Del análisis se puede concluir que en ROS, no hay un tipo de mensaje estándar enfocado para sensores Imu de 9 GDL.

En ROS se pueden transmitir mensajes de distintos tipos de un nodo a otro utilizando funciones que ayudan a sincronizar su envío y recepción, pero esto además de generar un gasto computacional extra no asegura que el nodo receptor pueda sincronizar siempre dos mensajes enviados en tiempos distintos. Sumado a esto, para la aplicación del filtro posterior, encargado del filtraje y estimación de la posición angular, se necesita recibir los datos que fueron tomados previamente por el sensor en un mismo instante de tiempo, para realizar el cálculo correctamente.

Es por esto que se ha decidido crear un mensaje personalizado que pueda ser transmitido y recibido conteniendo toda la información que se necesita transmitir. Este tipo de mensaje podría servir como un tipo adicional estándar para ROS para los sensores IMU de 9 GDL como el que se utiliza en el presente proyecto. Se enlistan las variables que contiene el mensaje personalizado en la Tabla 1Tabla 25. Cabe destacar que la variable “header.stamp” indica el tiempo al que fue enviado el mensaje por lo que el filtro posterior calcula el tiempo de muestreo gracias a este dato.

**Tabla 25**  
**Mensaje Imu9DOF**

Tipo	Nombre Variable	Subtipo	Nombre Variable
std_msgs/Header	header	uint32	seq
		time	stamp
		string	frame_id
geometry_msgs/Quaternion	Orientation	float64	x
		float64	y
		float64	z
		float64	w
geometry_msgs/Vector3	angular_velocity	float64	x
		float64	y
		float64	z
geometry_msgs/Vector3	linear_acceleration	float64	x
		float64	y
		float64	z
geometry_msgs/Vector3	magnetic_field	float64	x
		float64	y
		float64	z

### 3.11.3 Filtro complementario

Este nodo se encarga de recibir la información publicada por el nodo de la adquisición de datos y de calcular los datos estimados de la posición angular a partir de las mediciones directas del sensor. Adicional a esto se realiza el filtraje de ruido proveniente del sensor.

### 3.11.3.1 Configuración filtro complementario

Para la configuración y uso del paquete de ROS del filtro complementario se deben analizar los parámetros de entrada y salida definidos por el tipo de topics a los que se suscribe o publica y parámetros configurables que definen el procesamiento interno del filtro como tal.

Los topics a los que se suscribe y publican son los siguientes:

- **Topics Publicados:**
  - imu/data
  - imu/rpy/filtered
  - imu/steady\_state
  
- **Topics a suscribirse:**
  - imu/data\_raw
  - imu/mag

Originalmente el nodo del filtro complementario se suscribe a dos topics independientes, el primero proveniente de un sensor IMU de 6 GDL (imu/data\_raw) y el segundo de un magnetómetro opcional (imu/mag) como lo muestra la Figura 106. En este caso al ocupar los datos del magnetómetro, se vuelve ineficiente tratar con dos mensajes independientes que requerirán un subproceso de sincronización, para garantizar que los datos que llegan al filtro y son procesados, se hayan producido en un mismo instante de tiempo. Por esta razón se definió previamente un mensaje personalizado descrito en el apartado anterior detallado en la Tabla 25.

Debido a esto se debe modificar el código base del paquete original de ROS del filtro complementario, con el fin de que el nodo se suscriba únicamente a un solo topic, el cual cree un único enlace de comunicación.



**Figura 106 Algoritmo de filtro complementario**

En el caso de los topics publicados, los topics “imu/rpy/filtered” e “imu/steady\_state”, funcionan únicamente cuando el parámetro publish\_debug\_topics está habilitado en su configuración inicial, mientras q el topic “imu/data” es el topic de los datos de salida que son de interés principal, los datos se publican en forma de cuaterniones los cuales se pueden utilizar de esa manera o bien transformarlos a una manera de representación de

orientación más convencional como una matriz de rotación, ángulos de Euler, etc.

- **Parámetros configurables:**

- gain\_acc: Ganancia para el filtro complementario en el rango entre [0, 1].
- gain\_mag: Ganancia para el filtro complementario usando magnetómetro en el rango entre [0, 1].
- bias\_alpha: Ganancia para estimación de tendencia.
- do\_bias\_estimation: Habilitar o no la estimación de tendencia.
- do\_adaptive\_gain: Habilitar o no ganancia de filtro adaptativa.
- use\_mag: Habilitar o no el uso del magnetómetro
- fixed\_frame: El Sistema de coordenadas fijo a ser utilizado con el paquete tf de ROS.
- publish\_tf: Habilitar o no la publicación de tf transform de ROS que representa la orientación del sensor IMU.
- reverse\_tf; Habilitar o no la publicación de tf transform inversa de ROS que representa la orientación del sensor IMU.
- constant\_dt: El diferencial de tiempo que representa la frecuencia de muestreo del filtro. Si este es cero, se calcula automáticamente del dato de tiempo en que se obtienen los datos.
- publish\_debug\_topics: Habilitar o no la publicación de los topics para depuración.

De todos los parámetros descritos anteriormente se han definido los valores para cada uno mediante experimentación y observación. Cada uno de estos valores puede variar de sensor a sensor y se debe analizar independientemente.

Los resultados de este análisis para el uso de los parámetros de configuración de filtro de muestran a continuación en la Tabla 26.

**Tabla 26**  
**Parámetros filtro complementario ROS**

Parámetro	Tipo	Valor default	Valor Implementado
gain_acc	double	0.01	0.05
gain_mag	double	0.01	0.05
bias_alpha	double	0.01	0.01
do_bias_estimation	bool	true	true
do_adaptive_gain	bool	true	false
use_mag	bool	false	true
fixed_frame	string	odom	odom
publish_tf	bool	false	false
reverse_tf	bool	false	false
constant_dt	double	0.0	0.0
publish_debug_topics	bool	false	false

Se destaca el valor de ganancia del filtro el cual se fija en 0.05 el cual resultó demostrar los mejores resultados. Además de deshabilita el uso de la ganancia adaptativa, la cual se utiliza cuando el sensor IMU está influenciado por aceleraciones adicionales a la gravedad como lo sería en el caso de estar equipado en un robot volador como por ejemplo un cuadricóptero.

Los datos para depuración se habilitan únicamente en el proceso de ajuste de la ganancia del filtro y se deshabilitan en uso normal. El uso del magnetómetro se encuentra habilitado todo el tiempo de acuerdo al requerimiento del proyecto. Y por último la frecuencia de muestreo se la deja en cero para que sea adaptada a la velocidad de transmisión de los datos enviados desde el nodo de adquisición de datos.

### 3.11.3.2 Publicación de datos

Para publicar los datos obtenidos se utiliza el mismo tipo de mensaje personalizado utilizado anteriormente “Imu9DOF” el cual se describió en la Tabla 25. En este caso se utiliza la variable “orientation” para guardar las cuatro componentes del cuaternión que representa la estimación de orientación calculada por el filtro complementario.

Incluso para la transmisión de datos, la representación en cuaterniones de la orientación resulta más eficiente que la matriz de orientación, ya que

contiene cuatro datos para su representación, al contrario de los 9 datos que necesita una matriz de orientación.

### 3.11.4 Interfaz de usuario humano máquina

Este nodo se encarga del manejo del ambiente gráfico necesario para la interacción entre el robot y el usuario. Se compone de dos partes principales; la primera es un ambiente gráfico personalizado que sirve para el manejo manual de cada articulación del robot, así como para el inicio de la captura de movimiento y seguimiento en tiempo real, a esta primera parte se la llamará: “interfaz gráfica de usuario para control del robot” o “GUI control robot 7GDL”. Y la segunda parte, la compone la herramienta de simulación gráfica robótica del paquete “RVIZ” de ROS. Juntos forman una herramienta general para el control, simulación gráfica y depuración del robot y el sistema de captura de movimiento. Las dos herramientas se observan en la Figura 107, las dos se encuentran como ventanas internas que pueden ser minimizadas independientemente dentro del ambiente gráfico “rqt” de ROS que es donde se ejecuta la interfaz programada como un complemento o plugin de dicho paquete. El paquete “rqt” de ROS tiene la capacidad para ordenar múltiples plugins como ventanas internas y ejecutarlas simultáneamente de acuerdo a la necesidad del usuario.

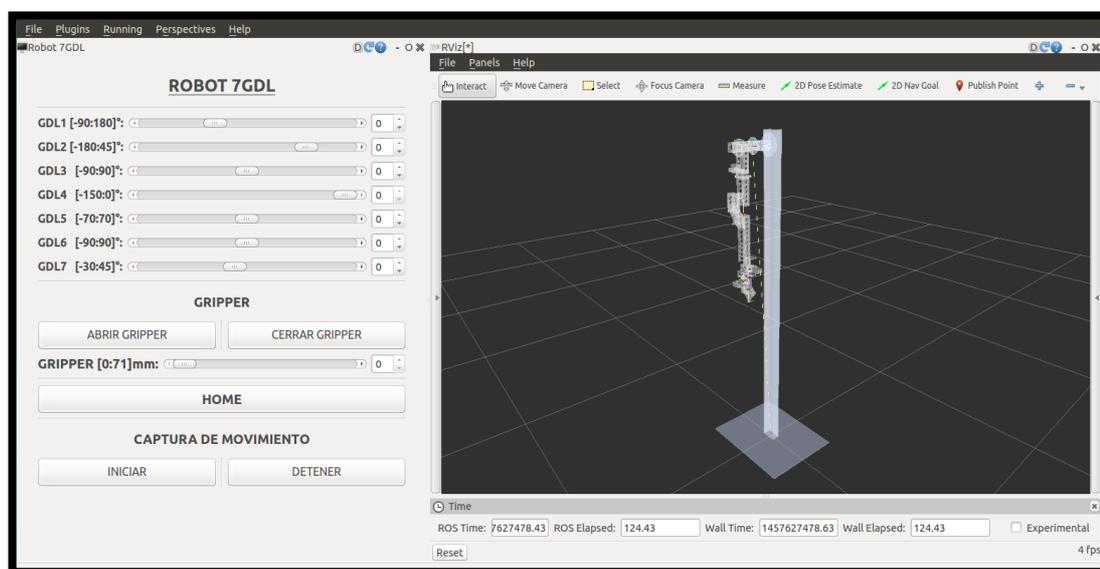
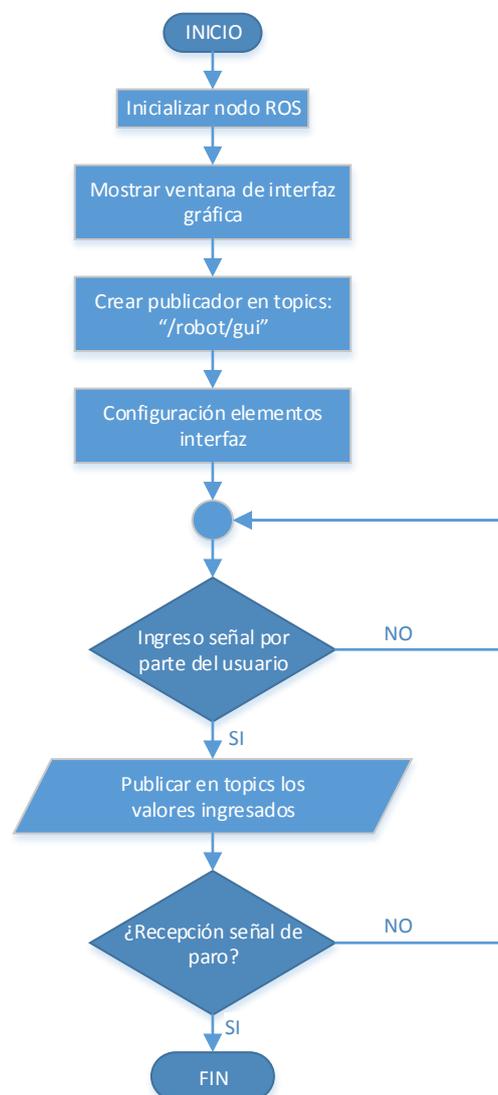


Figura 107 Interfaz gráfica general

En este caso se definen las dos ventanas que corresponden a las dos principales partes de la interfaz gráfica descritas anteriormente. La primera se encuentra al lado izquierdo con el nombre “Robot 7GDL” y la segunda al lado derecho con el nombre “RVIZ”.

A continuación en la Figura 108 se encuentra el algoritmo de la interfaz gráfica. Su funcionamiento es relativamente sencillo ya que únicamente reacciona cuando el usuario realiza algún tipo de interacción.



**Figura 108 Algoritmo GUI**

### 3.11.4.1 GUI control robot 7GDL

En el espacio de trabajo se encuentran algunas herramientas de control para el movimiento del robot. Como se observa en la Figura 109 la implementación gráfica de la ventana se compone por elementos tipo pushButton, sliders y spinBox. La implementación gráfica se ha programado en lenguaje XML en un archivo con extensión “.ui”, diseñado con la ayuda del IDE “Qt Creator”. Y finalmente para la implementación funcional de los elementos del GUI y su integración como un nodo ROS se ha programado en lenguaje C++.



**Figura 109 GUI control robot 7GDL**

En el GUI se puede controlar individualmente cada articulación del robot mientras el sistema de captura de movimiento se encuentre apagado. Así mismo existen dos controles manuales para el efector final de pinza, en el cual se puede regular su grado de apertura en una distancia de 0 a 71mm que es su apertura máxima, o directamente abrir o cerrar el gripper de forma directa.

También se ha agregado un pushButton para reiniciar la posición del robot a su estado de Home. Y de igual forma dos pushButton más para iniciar o parar el sistema de captura de movimiento.

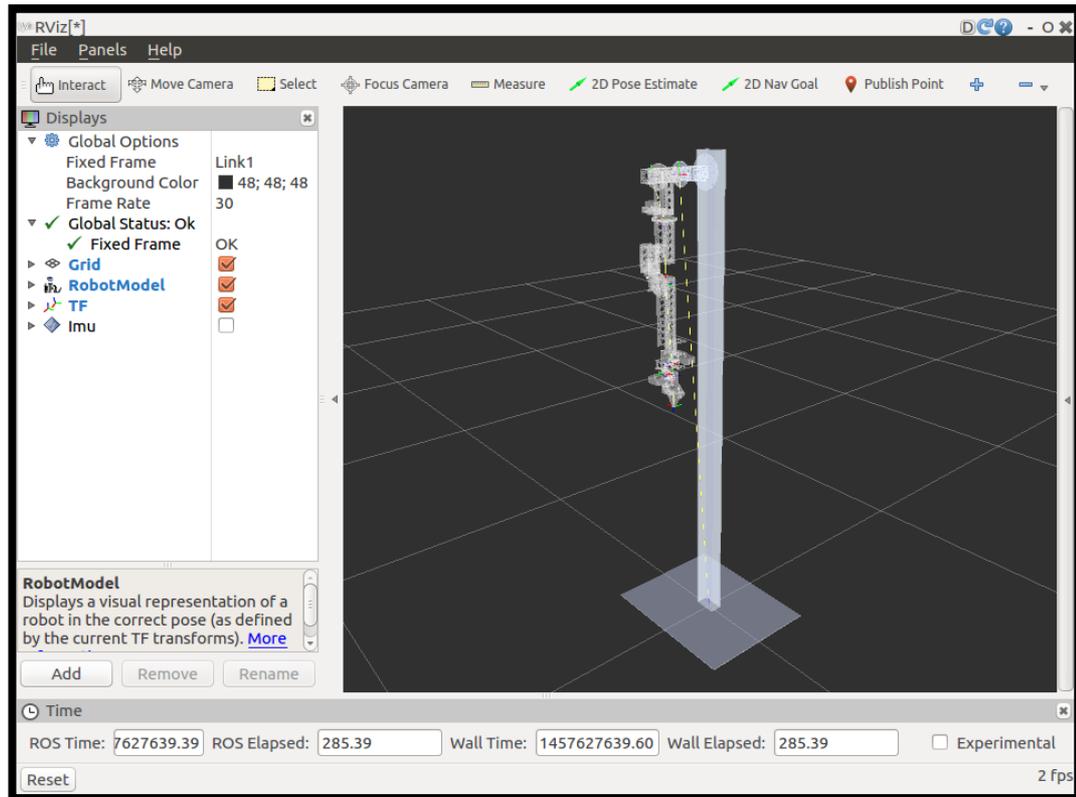
#### **3.11.4.2 Simulación gráfica RVIZ**

Gracias al paquete RVIZ de ROS se puede realizar una simulación gráfica del robot en tiempo real de su posición y orientación en el espacio. El uso de esta herramienta tiene el propósito de comprobar de manera visual el comportamiento del robot al momento de imitar los movimientos del operador humano.

RVIZ proporciona una herramienta gráfica de comprobación del sistema de captura de movimiento sin la necesidad de ejecutar el movimiento del robot real. El desarrollo de esta simulación gráfica es necesaria en la comprobación de funcionamiento y depuración del controlador de movimiento. De esta manera se pueden evitar fallos mecánicos por colisiones o sobre esfuerzos provocados por un mal funcionamiento. Una vez que el controlador de movimiento funcione correctamente en la simulación se puede optar por su ejecución en el robot real.

El paquete RVIZ puede contener múltiples plugins las cuales realizan un trabajo determinado e independiente. Toda la configuración en el uso de los plugins se puede realizar en la parte izquierda de la ventana, en la sección "Displays" como se observa en la Figura 110.

Existen 3 plugins de interés que se utilizan para la simulación gráfica que son: RobotModel, TF e Imu las cuales se pueden habilitar según su necesidad.



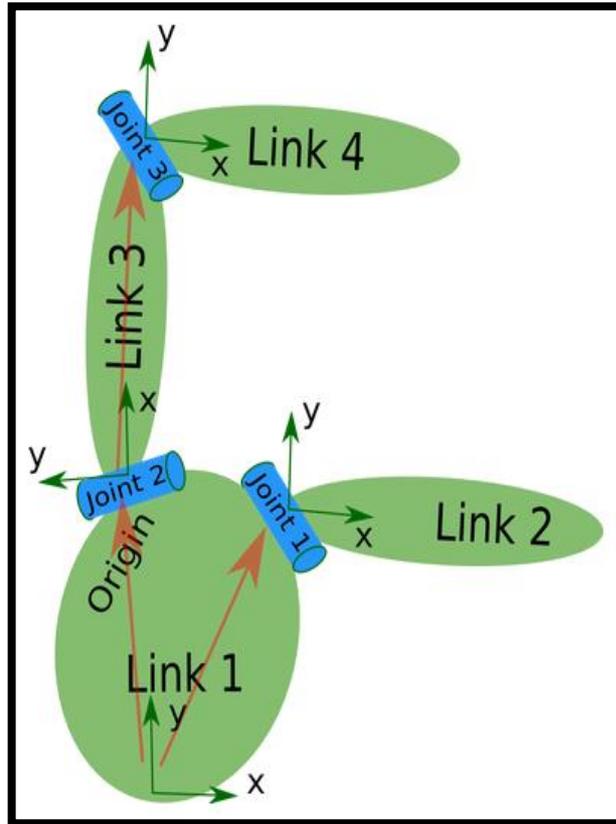
**Figura 110 Simulación RVIZ**

La primera llamada RobotModel es la más importante y de mayor uso ya que es la encargada de mostrar la visualización 3D de los elementos CAD.

Para esta simulación se debe definir un archivo en lenguaje XML llamado "model.xml" el cual contiene todas las definiciones necesarias, no solamente para la extensión RobotModel sino para la extensión TF.

Este archivo contiene la representación del modelo del robot en formato URDF (Unified Robot Description Format) que es un tipo de formato XML.

Este archivo define la posición de cada eslabón respecto a otro y también su posición respecto a un sistema de referencia fijo. Va construyendo una cadena de sistemas de coordenadas que se referencian uno después de otro. Esto sirve para que se pueda ejecutar el movimiento relativo de los mismos. Tal y como se observa en la Figura 111.

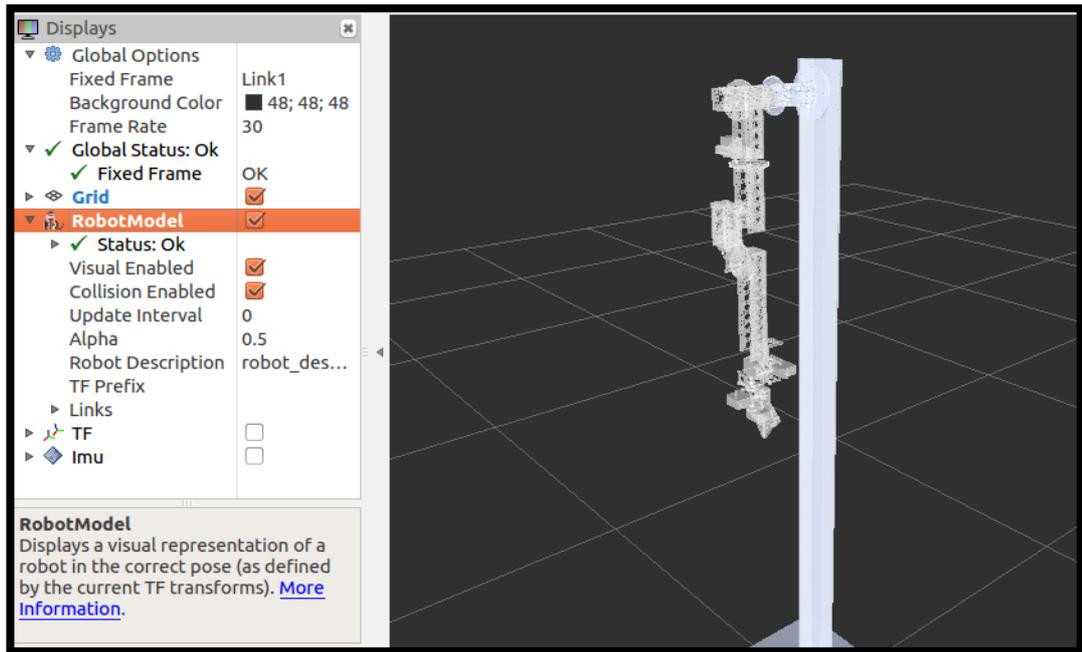


**Figura 111 Formato de descripción robótico URDF**

De esta manera se define la cadena cinemática que ocupa el paquete TF de ROS para su construcción y simulación gráfica.

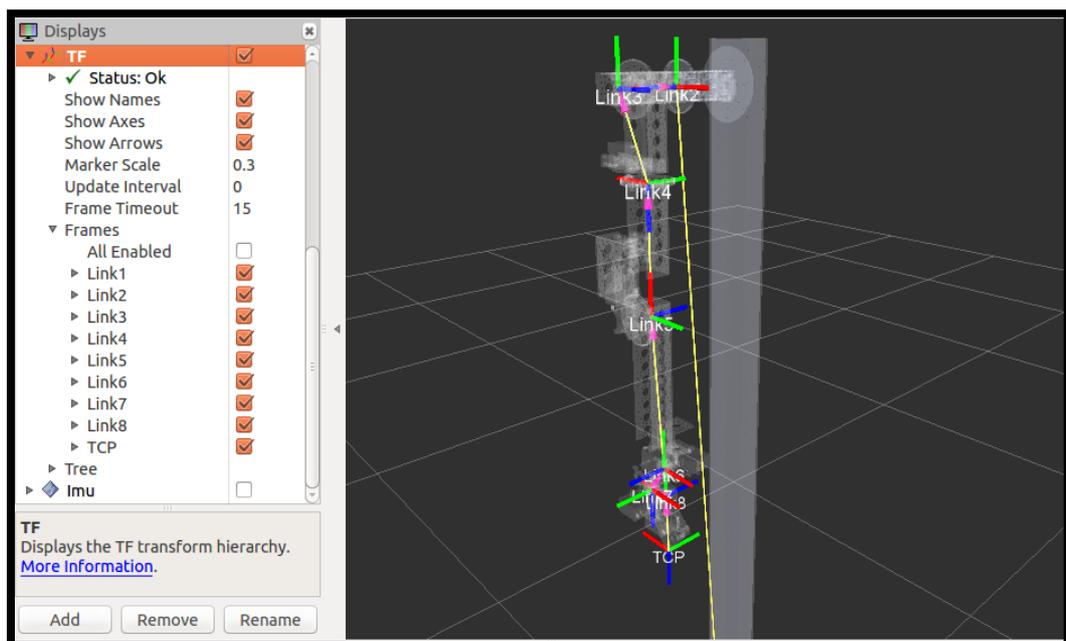
Adicional a esto se define la ubicación de los archivos con extensión STL guardados en el paquete ROS, que fueron exportados previamente del software CAD. Los archivos STL le van a dar la apariencia 3D real que se observa en la Figura 110 o Figura 112.

En la configuración del plugin RobotModel se puede habilitar o deshabilitar su visualización y adicionalmente su transparencia con el parámetro "Alpha" que puede variar de cero a uno como se puede observar en la parte izquierda de la Figura 112.



**Figura 112 Simulación RVIZ - RobotModel**

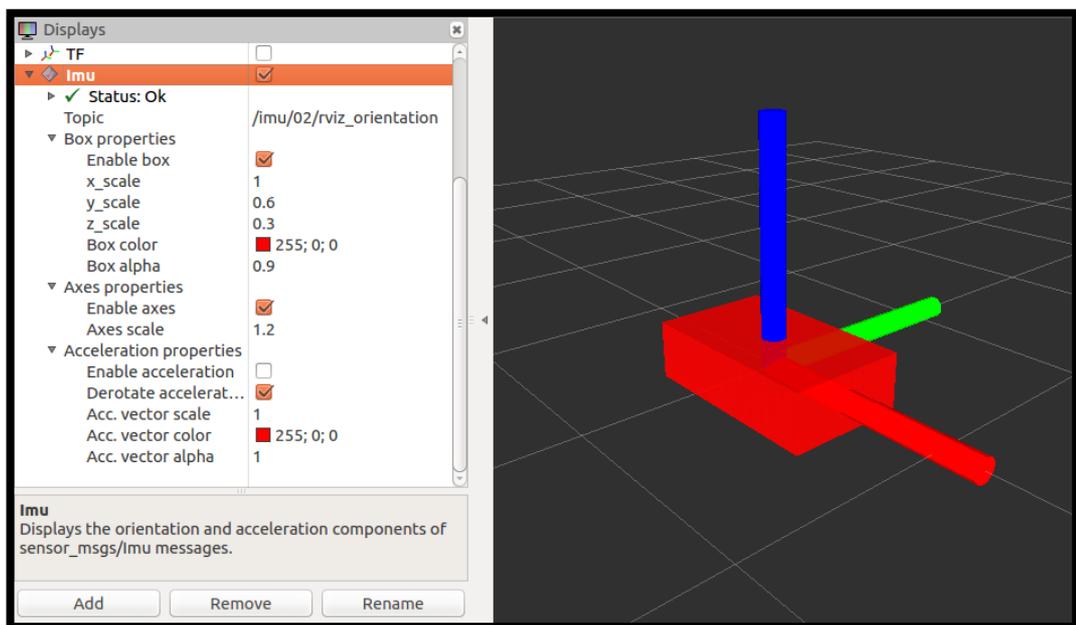
La cadena cinemática creada por el paquete TF se puede observar en la Figura 113, donde cada sistema de coordenadas tiene el nombre del eslabón al que pertenece desde el Link 1 hasta el Link8 y acompañado finalmente por el sistema de coordenadas TCP (Tool center point).



**Figura 113 Simulación RVIZ - TF**

De igual forma se puede configurar su transparencia y adicionalmente su tamaño, modificando el parámetro “Marker Scale” en la sección de configuración de TF.

Finalmente se encuentra el plugin Imu de RVIZ el cual sirve para visualizar en 3D de la orientación de un sensor inercial genérico de 6 o 9 GDL como se observa en la Figura 114. Este plugin es esencialmente útil para la comprobación del funcionamiento de los sensores y su depuración. Con la ayuda de ésta herramienta se ha podido comprobar de forma visual el funcionamiento de la velocidad de respuesta del sensor que depende en gran parte del nodo - filtro complementario y los ajustes de sus parámetros de configuración.



**Figura 114 Simulación RVIZ - Imu**

De la simulación RVIZ-Imu descrita anteriormente se puede observar el gran impacto que el parámetro de ganancia (gain\_mag) del nodo - filtro complementario tiene sobre la velocidad de respuesta del sensor. De esta manera se ayudó a comprobar que al escoger un valor cercano a uno, el sensor se vuelve más estable pero su velocidad de respuesta se reduce considerablemente por lo que su aplicación para este proyecto no serviría. Al

contrario al aproximarse a valores cercanos a cero la velocidad de respuesta aumenta a tiempo real pero se pierde estabilidad, es por esto que se debe encontrar un valor que sea un punto de equilibrio para el tipo de aplicación solicitada. Finalmente gracias a esta herramienta de simulación se puede comprobar visualmente la estabilidad y velocidad de respuesta del sensor con el valor configurado de ganancia del filtro de 0.05.

### 3.11.4.3 Publicación de datos

Este nodo publica una trama de datos en el topic “/robot/gui” que sirve para transmitir la información recibida por las órdenes del usuario hacia el control de movimientos y el control PWM de los actuadores eléctricos. La trama de información no es publicada continuamente, sino únicamente cuando se realiza un cambio de estado en los elementos de la interfaz gráfica de usuario, de esta manera se evita sobre cargar el tráfico de información en el sistema ROS.

La trama de información es un mensaje ROS de tipo “std\_msgs::Int16MultiArray” de 11 elementos descritos en la Tabla 27.

**Tabla 27**  
**Trama de mensaje GUI control robot 7GDL**

Elemento	Parámetro	Rango
1	GDL1	[-90:180] grad
2	GDL2	[-180:45] grad
3	GDL3	[-90:90] grad
4	GDL4	[-150:0] grad
5	GDL5	[-70:70] grad
6	GDL6	[-90:90] grad
7	GDL7	[-35:45] grad
8	ABRIR/CERRAR GRIPPER	[1,0]
9	GRIPPER	[-90:180] mm
10	HOME	[1,0]
11	ACTIVAR/DESACTIVAR CAPTURA DE MOVIMIENTO	[1,0]

### 3.11.5 Resolución de cinemática inversa

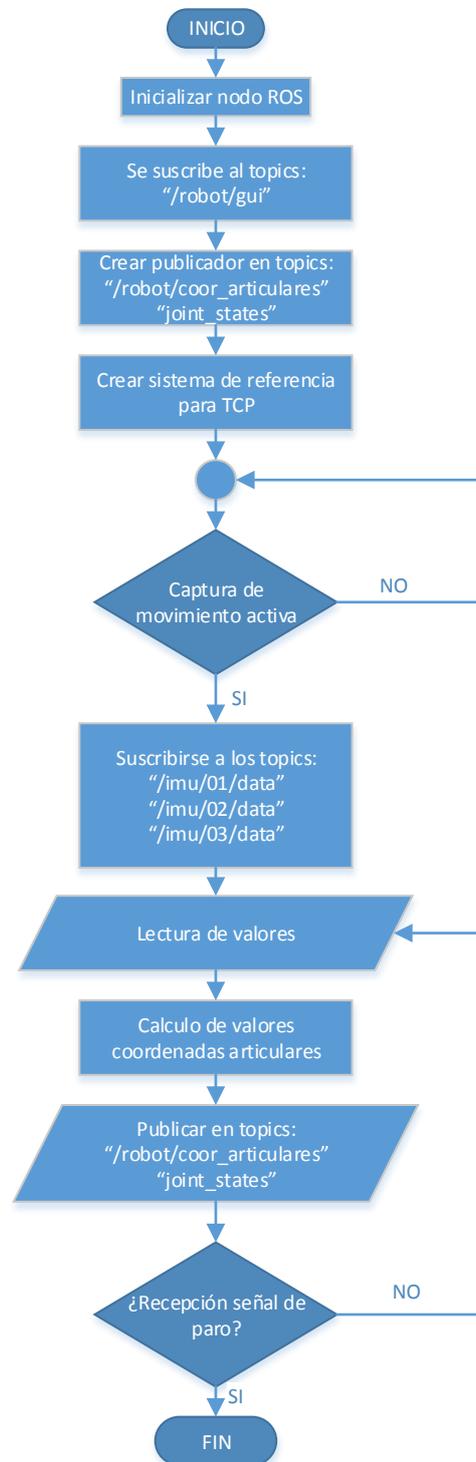


Figura 115 Algoritmo controlador de movimiento

El nodo “/robot” es el controlador de movimiento, es en donde se realiza la resolución de la cinemática inversa, se suscribe principalmente a los topics “/imu/01/data”, “/imu/02/data” e “/imu/03/data” los cuales le proporcionan la información filtrada de la orientación de los sensores y por medio de las ecuaciones deducidas en el apartado de cinemática inversa, se encarga de calcular las coordenadas articulares. En la Figura 115 se aprecia q el nodo se suscribe a los topics de los sensores, únicamente cuando se ha presionado el botón de inicio de captura de movimiento en la interfaz GUI control robot 7 GDL por parte del usuario.

#### **3.11.5.1 Cálculo cinemática inversa**

Se comienza leyendo los valores de la orientación proveniente de los sensores, los cuales se encuentran en forma de cuaterniones. Luego se deben transformar a su respectiva representación en la matriz de rotación 3x3 la cual se ha escogido para solucionar la cinemática inversa anteriormente. Esto se puede realizar fácilmente utilizando funciones incluidas en la librería de TF de ROS.

Finalmente se realiza el cálculo de las coordenadas articulares del 1 al 7 utilizando las ecuaciones desarrolladas en el apartado de cinemática inversa. Este cálculo se realiza dentro de una función “while” en donde se define una frecuencia a la cual se vuelve a repetir la función, y esta frecuencia se puede ajustar dependiendo de la capacidad de procesamiento de la computadora en donde se esté corriendo este nodo, de preferencia debido a la carga computacional que requiere este cálculo se prefiere utilizar una computadora de escritorio o portátil de media y altas prestaciones.

#### **3.11.5.2 Publicación de datos**

Una vez realizado el cálculo de las coordenadas articulares se publican en el topic “joint\_states”. Se utiliza el paquete de ROS “robot\_state\_publisher” para publicar el estado del robot al paquete TF de ROS y de esta forma saber a cada momento el estado cinemático de todo el robot. El paquete

“robot\_state\_publisher” ocupa el archivo URDF “model.xml” y las coordenadas articulares publicadas en “joint\_states” para calcular la cinemática directa y publicar los resultados en el paquete TF.

### 3.11.6 Control de actuadores



**Figura 116 Algoritmo PWM**

Este nodo se caracteriza por controlar la señal PWM que controla el movimiento de los servomotores del robot. Una vez recibidos los valores de posicionamiento articular publicado en el topic “joint\_states”, el nodo se

encarga de relacionar un requerimiento de posición angular, dado en radianes o ángulos sexagesimales, a una señal PWL equivalente que posicione los servomotores en el ángulo requerido. Tal como se indica en la Figura 116.

De manera similar funciona en un bucle while el cual realiza el cálculo de señal PWM constantemente únicamente cuando se ha activado el inicio de captura de movimiento. También se realiza el cálculo cuando se recibe algún cambio de estado en modo de control manual.

### **3.11.6.1 Control PWM**

Utilizando la librería proporcionada por el proveedor, SparkFun Electronics, llamada “SparkFun\_pca9685\_Edison.h”, se logra realizar el control de los registros del circuito integrado pca9685 PWM Driver, el cual está integrado en el módulo PWM para Intel Edison de SparkFun.

La función más importante de la librería permite controlar el tiempo de inicio y apagado del pulso PWM para cada canal independientemente. Esta función es “pwm.setChITime(SERVO1, 0, stopTime1)”. Donde el parámetro cero indica que la señal PWM se enciende en el tiempo cero y con la variable “stopTime1” se puede modificar la señal de acuerdo al requerimiento de posición. Adicional a esto se debe especificar primero uno de los 8 canales de salida del módulo para ser controlado.

De acuerdo a pruebas realizadas para buscar los valores que corresponden a las diferentes posiciones de cada servomotor, se comienza por encontrar los valores necesarios para la posición Home del robot. Y luego se encuentran los valores que corresponden a los valores máximos y mínimos del rango de movimiento. Todos los valores encontrados están descritos a continuación en la Tabla 28. El valor que se asigna a la variable stopTime es el valor de registro de 12 bits [0:4096] para apagar el pulso de PWM y de esta forma controlar el ciclo de trabajo.

Se ha definido la frecuencia del PWM en 50 Hz la cual es típicamente usada para el control de servomotores. El valor de registro de 12 bits funciona dependiendo de esta frecuencia donde para los 50 Hz, un ciclo de trabajo del 100% equivale a un tiempo de apagado de la señal a 20000 us.

Típicamente los servos de la marca Hitec se posicionan neutralmente a una señal de 1500 us y tienen un rango de funcionamiento estándar entre 1050 y 1950 us para un rango de movimiento de 90 grad. Los servomotores escogidos tienen la capacidad de ser programados para aumentar su rango de movimiento hasta llegar de 90 grad a 180 grad, con una señal aproximada entre 600 y 2400 us.

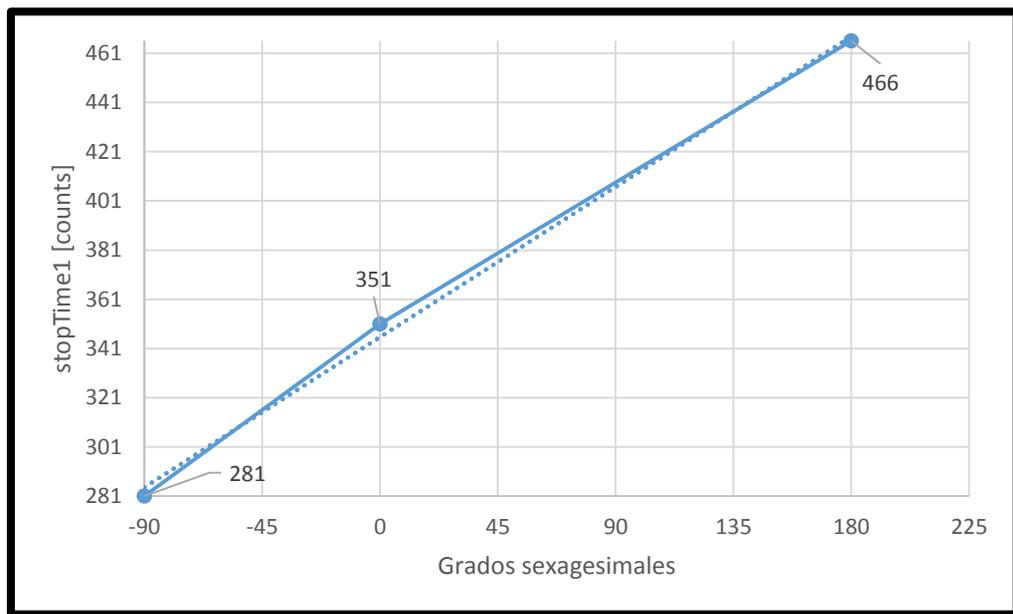
Para calcular el tiempo de apagado de la señal basta multiplicar el número del registro [0:4096] por el factor de cambio 4.8828 [us/counts] para obtener el tiempo de apagado de la señal. El factor de cambio se calcula dividiendo el tiempo que dura cada ciclo (20000 us) a la frecuencia determinada de 50Hz, para el número máximo que puede alcanzar el registro (4096).

De esta forma se puede determinar que el tiempo de control del servomotor 1 para la posición: home, máxima y mínima es: 1714, 1372 y 2275 us respectivamente.

**Tabla 28**  
**Valores para stopTime1 de PWM**

Variable	Motor	stopTime Home	Rango movimiento		Rango stopTime	
			MIN	MAX	MIN	MAX
stopTime1	GDL1	351	-90 grad	180 grad	281	466
stopTime2	GDL2	353	-180 grad	45 grad	238	384
stopTime3	GDL3	349	-90 grad	90 grad	261	453
stopTime4	GDL4	451	-150 grad	0 grad	277	451
stopTime5	GDL5	339	-70 grad	70 grad	505	174
stopTime6	GDL6	349	-90 grad	90 grad	477	227
stopTime7	GDL7	356	-35 grad	45 grad	422	233
stopTime8	GRIPPER	335	2.31 V	2.65 V	335	145

De la tabla descrita se concluye que se debe definir funciones de correspondencia para que el requerimiento de posición angular tenga su equivalente movimiento real en el servomotor. Por lo que se define para cada motor una función descrita por una recta. La recta que describe la primera función para el servomotor GDL1 se puede observar en la Figura 117.



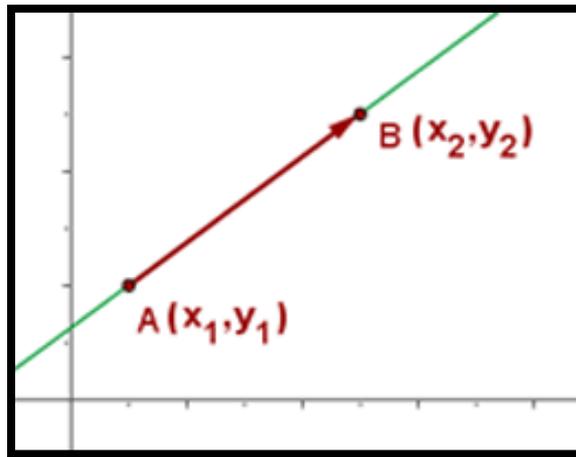
**Figura 117 Equivalencia entre grados y variable stopTime1**

Del gráfico anterior se puede observar que la recta en la sección de [-90:0] grad tiene una pendiente ligeramente distinta a la recta en la sección de [0:180] grad, esto se observa al comparar con la línea de tendencia lineal dibujada simultáneamente en el gráfico, como una sucesión de puntos. Por tal motivo para aumentar la precisión, se decide definir dos funciones independientes para valores menores de cero y mayores de cero correspondientemente.

Se procede a encontrar la ecuación de la recta que define tales valores de la forma:

$$y = m * x + n$$

Donde “m” es la pendiente de la recta y “n” el valor de intersección de la recta con el eje y. La recta está definida por el punto A(x<sub>1</sub>,y<sub>1</sub>) y B(x<sub>2</sub>,y<sub>2</sub>) como se plantea en la Figura 118.



**Figura 118 Ecuación recta**

Para la ecuación 1 en el rango de [0:180] grad, se define A(0,351) y B(180,466).

$$m = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} = \frac{466 - 351}{180 - 0} = 0.6388$$

Despejando n

$$n = y - m * x$$

Reemplazando para A(0,351)

$$n = y_1 - m * x_1 = 351 - (0.6388 * 0) = 351$$

Resulta la ecuación final para el rango de [0:180] grad

$$y = m * x + n$$

$$y = 0.6388 * x + 351 \quad \text{para } x \in [0: 180] \quad \text{ECUACION GDL1 POSITIVA}$$

Para la ecuación 2 en el rango de [-90:0] grad, se define A(-90,281) y B(0,351).

$$m = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} = \frac{351 - 281}{0 - (-90)} = 0.7777$$

Despejando n

$$n = y - m * x$$

Reemplazando para B(0,351)

$$n = y_2 - m * x_2 = 351 - (0.7777 * 0) = 351$$

Resulta la ecuación final para el rango de [-90:0] grad

$$y = m * x + n$$

$$y = 0.7777 * x + 351 \quad \text{para } x \in [-90:0] \quad \text{ECUACION GDL1 NEGATIVA}$$

De esta manera se sigue resolviendo con el mismo método para encontrar las siguientes ecuaciones:

Para GDL2:

$$y = 0.6888 * x + 353 \quad \text{para } x \in [0:45] \quad \text{ECUACION GDL2 POSITIVA}$$

$$y = 0.6388 * x + 353 \quad \text{para } x \in [-180:0] \quad \text{ECUACION GDL2 NEGATIVA}$$

Para GDL3:

$$y = 1.1555 * x + 349 \quad \text{para } x \in [0:90] \quad \text{ECUACION GDL3 POSITIVA}$$

$$y = 0.9777 * x + 349 \quad \text{para } x \in [-45:0] \quad \text{ECUACION GDL3 NEGATIVA}$$

Para GDL4:

$$y = 1.16 * x + 451 \quad \text{para } x \in [-150:0] \quad \text{ECUACION GDL4 NEGATIVA}$$

Para GDL5:

$$y = -2.3555 * x + 339 \quad \text{para } x \in [0: 45] \quad \text{ECUACION GDL5 POSITIVA}$$

$$y = -2.3777 * x + 339 \quad \text{para } x \in [-45: 0] \quad \text{ECUACION GDL5 NEGATIVA}$$

Para GDL6:

$$y = -1.3555 * x + 349 \quad \text{para } x \in [0: 90] \quad \text{ECUACION GDL6 POSITIVA}$$

$$y = -1.4222 * x + 349 \quad \text{para } x \in [-90: 0] \quad \text{ECUACION GDL6 NEGATIVA}$$

Para GDL7:

$$y = -2.3555 * x + 339 \quad \text{para } x \in [0: 45] \quad \text{ECUACION GDL7 POSITIVA}$$

$$y = -2.3777 * x + 339 \quad \text{para } x \in [-45: 0] \quad \text{ECUACION GDL7 NEGATIVA}$$

Para Gripper:

$$y = -558.8235 * x + 1625.8824 \quad \text{para } x \in [-2.31: 2.65] V \quad \text{ECUACION GRIPPER}$$

En resumen, los datos de las coordenadas articulares recibidos en el nodo, son los valores “x” de las ecuaciones que una vez ingresados en la ecuación, sirve para calcula el valor “y”, esta es la variable stopTime de cada motor que es la que se ingresa en la función para controlar el PWM de los actuadores.

### 3.11.6.2 Control pinza paralela

Esto nodo se conecta directamente al topic del sensor Flex, utilizado para la apertura y cierre de la pinza, que publica su estado en “/imu/03/flex\_sensor”.

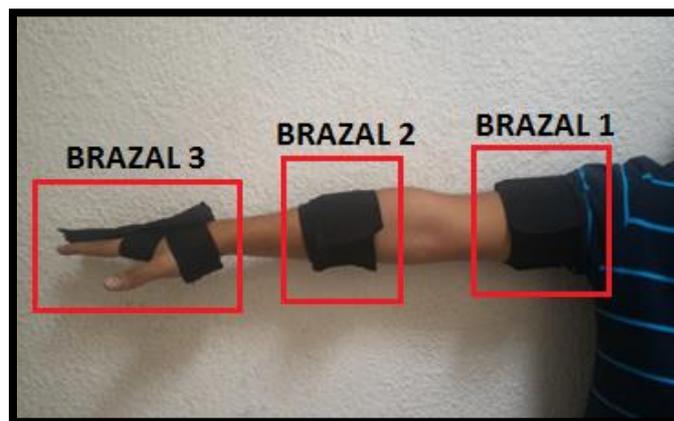
Se ha calibrado anteriormente el funcionamiento del sensor para que varié la señal de voltaje en la entrada analógica de 2.31 a 2.65 V. Este valor equivale a un valor de stopTime de 335 y 145 respectivamente. El valor de 335 corresponde al valor máximo de apertura de la pinza de 71 mm y el valor de 145 corresponde al estado de cierre completo de la pinza.

### 3.12 SISTEMA DE BRAZALETES PARA UNIDADES INERCIALES

En este apartado se detalla las consideraciones más relevantes empleadas para el diseño del sistema de brazaletes; considerando que el sistema de brazaletes se ubicará en la extremidad superior del operador con el fin de dar soporte a los sensores inerciales.

Los brazaletes han sido confeccionados con tres tipos de materiales: tela, elástico y velcro, todos de color negro

El brazal 1 se ubica en el brazo en los niveles entre el hombro y codo, el brazal 2 se ubica en el antebrazo entre codo y muñeca y el brazal 3 además de ubicarse en la posición de la mano, se extiende utilizando como soporte el dedo medio de mano. (Figura 119)



**Figura 119 Sistema de brazaletes**

El brazalete 1 y 2 son idénticos excepto en su longitud que varía de acuerdo a la dimensiones del brazo. En su interior se encuentra un elástico que sostiene al sensor inercial como se observa en la Figura 120.



**Figura 120 Brazaletes 1 y 2**

El brazalete 3 difiere de los dos primeros en que posee un bolsillo adicional a lo largo del dedo de la mano para ubicar el sensor Flex resistivo como se observa en la Figura 121.



**Figura 121 Brazaletes 3**

## CAPÍTULO 4.

### PRUEBAS Y RESULTADOS

#### 4.1 PRUEBA DE ORIENTACIÓN

Para la realización de esta prueba se ha usado como componente fundamental el sistema de captura de movimiento, el mismo que se encarga del envío de los datos de los sensores IMU al controlador de movimiento.

En esta prueba se evaluará la orientación del brazo robótico mientras imita al operador utilizando el sistema de captura de movimiento. El objetivo principal es verificar que el robot pueda realizar los movimientos básicos del brazo humano descritos previamente en el apartado Biomecánica de la extremidad superior.

##### 4.1.1 Movimiento de flexión del hombro

Para el movimiento de flexión del hombro, se necesita el valor de la coordenada articular  $q_1$  obtenida del proceso de resolución de la cinemática inversa, utilizando únicamente los datos de orientación del IMU1.



Figura 122 Flexión del hombro

#### 4.1.2 Movimiento de abducción del hombro

Para el movimiento de abducción del hombro, se necesita el valor de la coordenada articular  $q_2$  obtenida del proceso de resolución de la cinemática inversa, utilizando únicamente los datos de orientación del IMU1.



**Figura 123 Abducción del hombro**

#### 4.1.3 Movimiento de flexión y extensión horizontal del hombro

Para el movimiento de flexión y extensión horizontal del hombro, se necesita los valores de las coordenadas articulares de  $q_1$  y  $q_2$  obtenidas del proceso de resolución de la cinemática inversa, utilizando únicamente los datos de orientación del IMU1.



**Figura 124 Flexión y extensión del hombro**

#### 4.1.4 Movimiento de rotación interna y externa del brazo

Para el movimiento de rotación interna y externa del brazo, se necesita el valor de la coordenada articular  $q_3$  utilizando los datos de orientación del

IMU1 y la coordenada articular  $q_4$  utilizando los datos de orientación del IMU2, obtenidas del proceso de resolución de la cinemática inversa.



**Figura 125 Rotación interna y externa del brazo**

#### 4.1.5 Movimiento de flexión del codo

Para el movimiento de flexión del codo, se necesita el valor de la coordenada articular  $q_4$  obtenida del proceso de resolución de la cinemática inversa, utilizando únicamente los datos de orientación del IMU2.



**Figura 126 Flexión del codo**

#### 4.1.6 Movimiento de flexión y extensión vertical de la muñeca

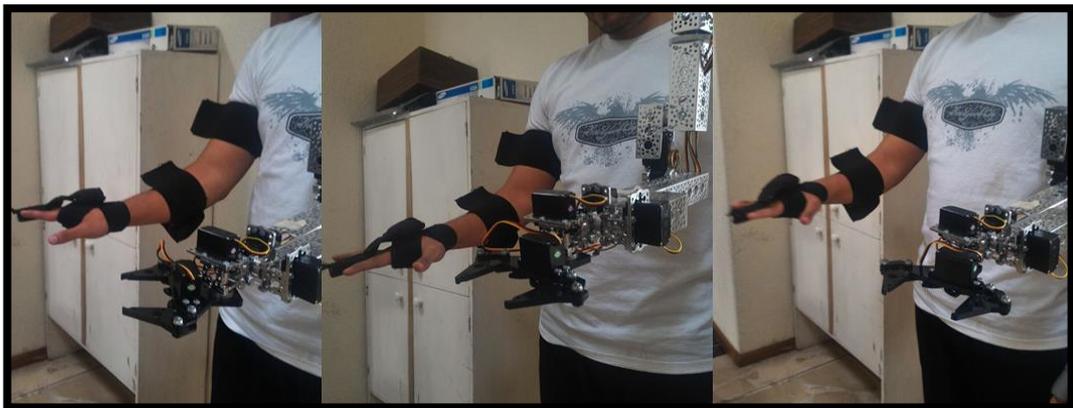
Para el movimiento de flexión y extensión de la muñeca, se necesita el valor de la coordenada articular de  $q_5$  obtenida del proceso de resolución de la cinemática inversa, utilizando únicamente los datos de orientación del IMU3.



**Figura 127 Flexión y extensión de la muñeca vertical**

#### **4.1.7 Movimiento de flexión y extensión horizontal de la muñeca**

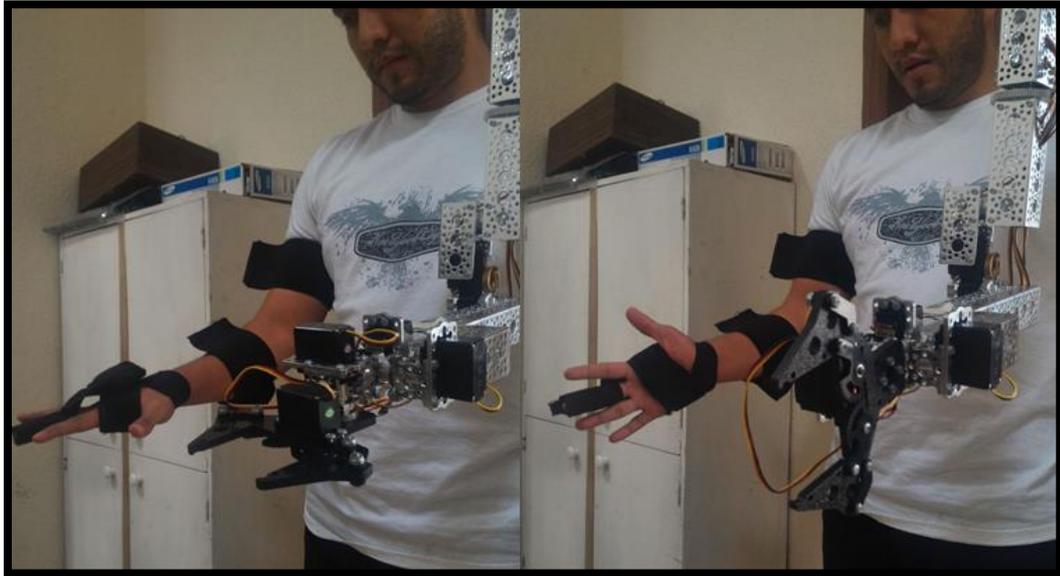
Para el movimiento de flexión y extensión horizontal de la muñeca, se necesita el valor de la coordenada articular de  $q_6$  obtenida del proceso de resolución de la cinemática inversa, utilizando únicamente los datos de orientación del IMU3.



**Figura 128 Flexión y extensión de la muñeca horizontal**

#### **4.1.8 Movimiento supinación de muñeca**

Para el movimiento supinación de muñeca, se necesita el valor de la coordenada articular de  $q_7$  obtenida del proceso de resolución de la cinemática inversa, utilizando únicamente los datos de orientación del IMU3.



**Figura 129 Supinación muñeca**

#### 4.1.9 Resultados prueba de orientación

Los resultados obtenidos se determinaron de forma cualitativa caracterizándolos de dos maneras: “Cumple” y “No cumple” como se observa en la Tabla 29 a continuación.

**Tabla 29**  
**Resultados prueba de orientación**

<b>MOVIMIENTO</b>	<b>RESULTADO</b>
Flexión del hombro	Cumple
Abducción del hombro	Cumple
Flexión y extensión horizontal del hombro	Cumple
Rotación interna y externa del brazo	Cumple
Flexión del codo.	Cumple
Flexión y extensión vertical de la muñeca	Cumple
Flexión y extensión horizontal de la muñeca	Cumple
Supinación de muñeca	Cumple

De acuerdo a los resultados se puede observar que el movimiento del brazo robótico cumple con todos los movimientos básicos del brazo humano planteados en un principio.

## 4.2 PRUEBA DE VELOCIDAD

En esta prueba se comprobará la velocidad del sistema del brazo robótico en modo manual. Por lo que se determinará en un principio el tiempo que transcurre desde que se produce el cambio de PWM hasta que el brazo ejecuta la acción.

Los movimientos ejecutados en esta prueba están ligados a cada servomotor, dichos movimientos están relacionados con los movimientos ejecutados en la prueba de orientación.

Se debe considerar para esta prueba los retardo de comunicación wifi, así como el tiempo de procesamiento del computador y los controladores Intel Edison. También hay que tener en cuenta el peso de la estructura mecánica del robot y la potencia de cada uno de los servomotores.

En la Tabla 30 a continuación se muestra los valores de los tiempos obtenidos para cada servomotor con un desplazamiento angular de 90° ejecutados desde el HMI utilizando el modo control manual.

**Tabla 30**  
**Tiempo de respuesta HMI control manual**

90°	servo1	servo2	servo3	servo4	servo5	servo6	servo7
1	2,39	1,79	0,63	0,72	0,42	0,30	0,20
2	2,25	1,81	0,77	0,85	0,53	0,25	0,24
3	2,30	1,72	0,92	0,75	0,50	0,27	0,23
4	2,50	1,85	0,67	0,72	0,54	0,27	0,26
5	2,58	1,90	0,83	0,66	0,41	0,28	0,25
6	2,16	1,89	0,70	0,62	0,33	0,27	0,21
7	2,17	1,91	0,60	0,66	0,47	0,28	0,22
8	2,27	1,87	0,64	0,68	0,31	0,25	0,17
9	2,25	2,02	0,85	0,58	0,39	0,23	0,20
10	2,20	2,01	0,64	0,61	0,53	0,33	0,24

Con estos datos se saca el promedio general del tiempo de respuesta en cada servomotor para poder determinar la velocidad practica de los mismos. A continuación en la Tabla 31 se muestra los valores promedios de los tiempo y las velocidades de respuesta para 90° y 60°.

**Tabla 31**  
**Análisis velocidades**

Servo	Promedio	Velocidad a 90° - 7.4 V	Velocidad a 60° - 7.4 V
servo1	2,307	2,307 sec/90°	1,54 sec/60°
servo2	1,877	1,877 sec/90°	1,25 sec/60°
servo3	0,725	0,725 sec/90°	0,48 sec/60°
servo4	0,685	0,685 sec/90°	0,46 sec/60°
servo5	0,443	0,443 sec/90°	0,30 sec/60°
servo6	0,273	0,273 sec/90°	0,18 sec/60°
servo7	0,222	0,222 sec/90°	0,15 sec/60°

De acuerdo a los resultados obtenidos se puede observar que hay una disminución de la velocidad con respecto a los valores de los catálogos de los servos. Esto se debe ya que en los catálogos se mide la velocidad de los servos pero sin carga, al estar en nuestro caso los servomotores formando parte de una cadena cinemática, es decir que están con carga, los valores de las velocidades varían. Produciendo que los servos que se encuentra más cercanos al extremo del brazo vayan igualándose a las velocidades de los catálogos, ya que tienen menor carga.

### 4.3 PRUEBA DE TIEMPOS DE RESPUESTA

Mediante esta prueba se comprobará la eficiencia del sistema MoCap con respecto al tiempo. Se determinará el tiempo que transcurre desde que el operario realiza el movimiento por medio del sistema MoCap hasta que el brazo ejecuta la acción. Los movimientos a ejecutarse al igual que la prueba de velocidad también están ligados a los grados de libertad que posee el robot y por ende a cada servomotor. En las siguientes tablas se muestra los valores de los tiempos obtenidos.

**Tabla 32**  
**Tiempo desplazamiento articulaciones**

90°	Art 1	Art 2	Art 3	Art 4	Art 5	Art 6	Art 7
1	1,16	1,94	1,42	1,23	1,29	1,23	1,37
2	1,35	1,70	1,32	1,42	1,29	1,31	1,35

Continúa 

3	1,38	1,86	1,40	1,45	1,27	1,23	1,31
4	1,72	2,14	1,33	1,29	1,25	1,33	1,42
5	1,94	2,56	1,40	1,44	1,27	1,40	1,20
6	1,50	1,83	1,25	1,28	1,42	1,36	1,40
7	1,45	1,94	1,40	1,33	1,35	1,40	1,26
8	1,57	1,82	1,25	1,44	1,35	1,38	1,33
9	1,56	1,82	1,33	1,50	1,17	1,26	1,29
10	1,95	1,91	1,37	1,41	1,47	1,40	1,33
PROM	1,56	1,95	1,35	1,38	1,31	1,33	1,33

**Tabla 33****Tiempo de respuesta desplazamiento articulaciones**

90°	servo1	servo2	servo3	servo4	servo5	servo6	servo7
1	2,58	2,26	2,02	1,81	1,83	1,90	2,07
2	2,96	2,00	2,46	2,08	1,83	1,85	1,80
3	2,90	2,28	2,03	1,80	2,09	2,01	2,02
4	2,78	2,69	1,85	2,03	1,84	1,82	2,09
5	2,94	1,91	2,12	1,88	2,09	2,05	1,80
6	2,62	1,69	2,12	1,77	2,09	1,89	1,96
7	2,83	1,34	2,01	1,85	1,65	1,70	1,70
8	3,00	1,53	1,81	1,80	1,94	1,86	2,11
9	2,67	1,51	1,98	2,17	1,52	1,68	1,78
10	3,00	2,59	2,15	1,83	1,96	1,90	1,89
PROM	2,82	1,98	2,01	1,90	1,88	1,87	1,92

Los datos obtenidos demuestran que los tiempos de respuesta del brazo robótico son muy cercanos a los realizados por cada articulación.

Se promedia a continuación en la Tabla 34 la velocidad a la que fue realizada la prueba para tener el dato de referencia al cual se calcularán los tiempos de retardo.

**Tabla 34****Velocidad promedio usada en la prueba**

Velocidad	servo1	servo2	servo3	servo4	servo5	servo6	servo7	PROM
grad/seg	57,69	46,15	66,66	65,21	68,70	67,66	67,66	62,81

Y finalmente se muestra en la Tabla 35 el tiempo de retardo promedio por cada articulación de la operación del manipulador robótico a una velocidad aproximada de 60 grad/seg por cada articulación.

**Tabla 35****Tiempo promedio de retardo a 60 grad/seg**

TIEMPO (seg)	servo1	servo2	servo3	servo4	servo5	servo6	servo7
<b>OPERADOR</b>	1,56	1,95	1,35	1,38	1,31	1,33	1,33
<b>ROBOT</b>	2,82	1,98	2,01	1,90	1,88	1,87	1,92
<b>RETARDO</b>	1.26	0.03	0.66	0.52	0.57	0.54	0.59

El tiempo de retardo promedio para todas las articulaciones es de 0.59 segundos. Este tiempo se considera el tiempo de retardo general que tiene el manipulador robótico cuando funciona a una velocidad promedio por articulación de 60 grad/seg.

#### 4.4 PRUEBA DE MANIPULACIÓN DE OBJETOS

En esta prueba se ha realizado la manipulación de distintos objetos, con el fin de evaluar el nivel de dificultad que se encuentra en el proceso de agarre y posicionamiento de los objetos trasladándolos de un lugar a otro.

El brazo robótico tiene una capacidad máxima de carga de 200 g, por lo cual no se ha excedido esta carga en los objetos utilizados para esta prueba indicados en la Figura 130. A pesar de esto, se ha escogido un objeto que posee la carga máxima del robot, para poder validar la correcta manipulación del mismo.

**Figura 130 Manipulación de objetos**

La prueba consiste en la evaluación del nivel de dificultad por parte de dos operadores en una escala del uno al cinco siendo: uno, muy fácil; dos, fácil; tres, moderado; cuatro, difícil; cinco, muy difícil.

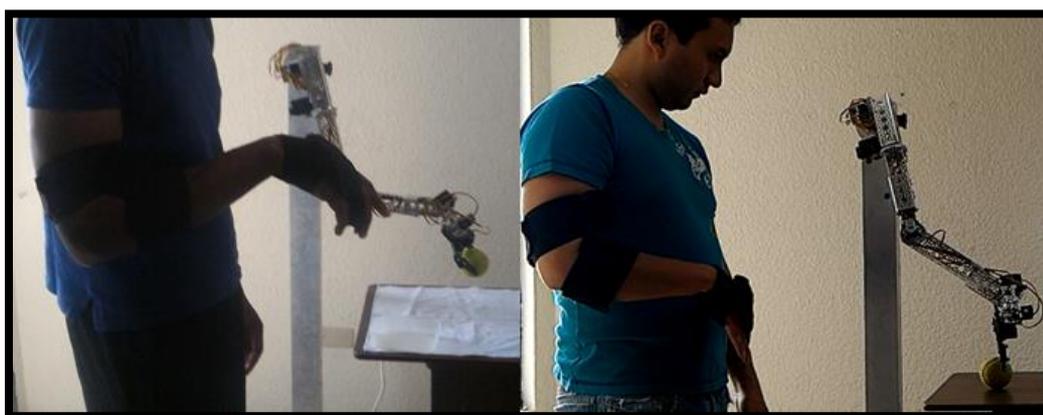
En la Tabla 36 a continuación se observa los resultados.

**Tabla 36 Manipulación objetos**

#	Objeto	Peso [g]	Dimensión [mm]	Dificultad	
				Operador 1	Operador 2
1	Pelota A	54	Ø 65	4	4
2	Pelota B	46	Ø 43	3	5
3	Marcador	19	Ø 65	1	2
4	Cubo	85	57x57x57	3	3
5	Estuche celular	49	120x70x17	2	3
6	Lata	13	Ø 65	5	5
7	Embase con liquido	200	Ø 65	4	5

Existen tres tipos de solidos con los que se identifican los objetos utilizados, los cuales son: el cubo, la esfera y el cilindro.

Al trabajar en una superficie plana rígida se observa que los elementos que presentan mayor dificultad son los del tipo esférico, porque ruedan fácilmente al ser ligeramente empujados. Por tal motivo si se quisiera trabajar únicamente con elementos esféricos, se recomienda el uso de una superficie blanda, como lo puede ser una tela o esponja. (Figura 131)



**Figura 131 Manipulación de objetos redondos**

Las dimensiones de los elementos son un parámetro importante para el proceso de agarre de los mismos, ya que la apertura máxima de la pinza es de 71 mm, no se puede exceder este valor en el punto de agarre. Cabe

destacar que de acuerdo a las pruebas realizadas, se observó que en los objetos que poseen mayores dimensiones, cercanos a 71 mm, se vuelve más difícil el posicionamiento y la orientación de la pinza antes de poder cerrarla. Este fue el parámetro más importante que influenció en la calificación definida por los usuarios, siendo en términos generales los elementos pequeños fáciles de manipular y los elementos grandes difíciles de manipular. (Figura 132)



**Figura 132 Manipulación de objetos grandes**

Se ha trabajado con dos operadores de distinto nivel de experiencia con el uso del sistema de captura de movimiento, por lo que se ha determinado que mientras mayor sea la práctica con el sistema MoCap, menor será la dificultad en la manipulación de objetos hasta cierto límite, es decir la forma y el tamaño del objeto tienen mayor influencia en la facilidad de manipulación, que la experiencia con el sistema MoCap del usuario.



**Figura 133 Manipulación de objetos livianos**

Se observó adicionalmente en la realización de esta prueba, un parámetro a ser tomado en cuenta, la fuerza de sujeción de la pinza depende del coeficiente de fricción de las superficies de contacto involucradas y así mismo de la fuerza que pueda generar el motor de la pinza sea de 3.7 Kg.cm. (Figura 133)

#### **4.5 PRUEBA DE CARGA MAXIMA**

En esta prueba se realizó la validación de la carga máxima del robot, para lo cual se ha dispuesto cuatro posiciones en las que el brazo robótico realiza sus mayores esfuerzos, en los ángulos de 90° de flexión de codo y hombro.

Normalmente el brazo robótico se dispondrá en una posición de trabajo en la que se encuentra una mesa al frente de este, donde se ubica el material a ser manipulado. Esta mesa está ubicada a una altura inferior a la altura a la que se encuentra el hombro, por lo que el rango máximo de movimiento del hombro para alcanzar la superficie de la mesa es aproximadamente 60°. Por esta misma razón se realizó también una validación de movimiento de 60° del codo.

La prueba consistió en cargar el efector final con pesos desde 25 a 225 gramos, aumentando gradualmente 25 gramos en cada prueba para observar de manera práctica el alcance máximo que el robot puede soportar hasta que el peso de la carga impida el movimiento normal de alguna de las articulaciones del robot.

Mediante esta prueba se observó que los puntos más débiles del robot cuando está sometido a carga se encuentran en el hombro y en el codo. Esto se debe al torque producido por la distancia a la que se encuentra la carga respecto de las articulaciones.

**Tabla 37**  
**Carga máxima**

Peso [g]	Flexión codo 90°	Flexión codo 60°	Flexión hombro 90°	Flexión hombro 60°
25	SI	SI	SI	SI
50	SI	SI	SI	SI
75	SI	SI	SI	SI
100	SI	SI	SI	SI
125	SI	SI	SI	SI
150	SI	SI	NO	SI
175	SI	SI	NO	SI
200	SI	SI	NO	SI
225	NO	SI	NO	NO
250	NO	NO	NO	NO

## 4.6 PRUEBA DE PROCESAMIENTO COMPUTACIONAL

Para esta prueba se evalúa la carga computacional en los tres tipos de estaciones utilizadas. La primera es la máquina principal, la cual es el nodo master; la segunda es la máquina inercial, encargada de la adquisición de datos del sensor inercial y la máquina del robot, que se encarga de la señal PWM.

Ya que las máquinas cuentan con una distribución Linux, se puede evaluar el uso del CPU que los nodos requieren utilizando el comando “top”, el resultado se describe a continuación.

### 4.6.1 Máquina principal

Esta máquina cuenta con Ubuntu como SO el cual está encargado de realizar el procesamiento matemático de la resolución de la cinemática inversa, correr el HMI y la simulación gráfica Rviz y por ultimo sirve como nodo maestro para la comunicación del sistema ROS. La máquina cuenta con un procesador intel core I7 y 4 GB de memoria RAM.

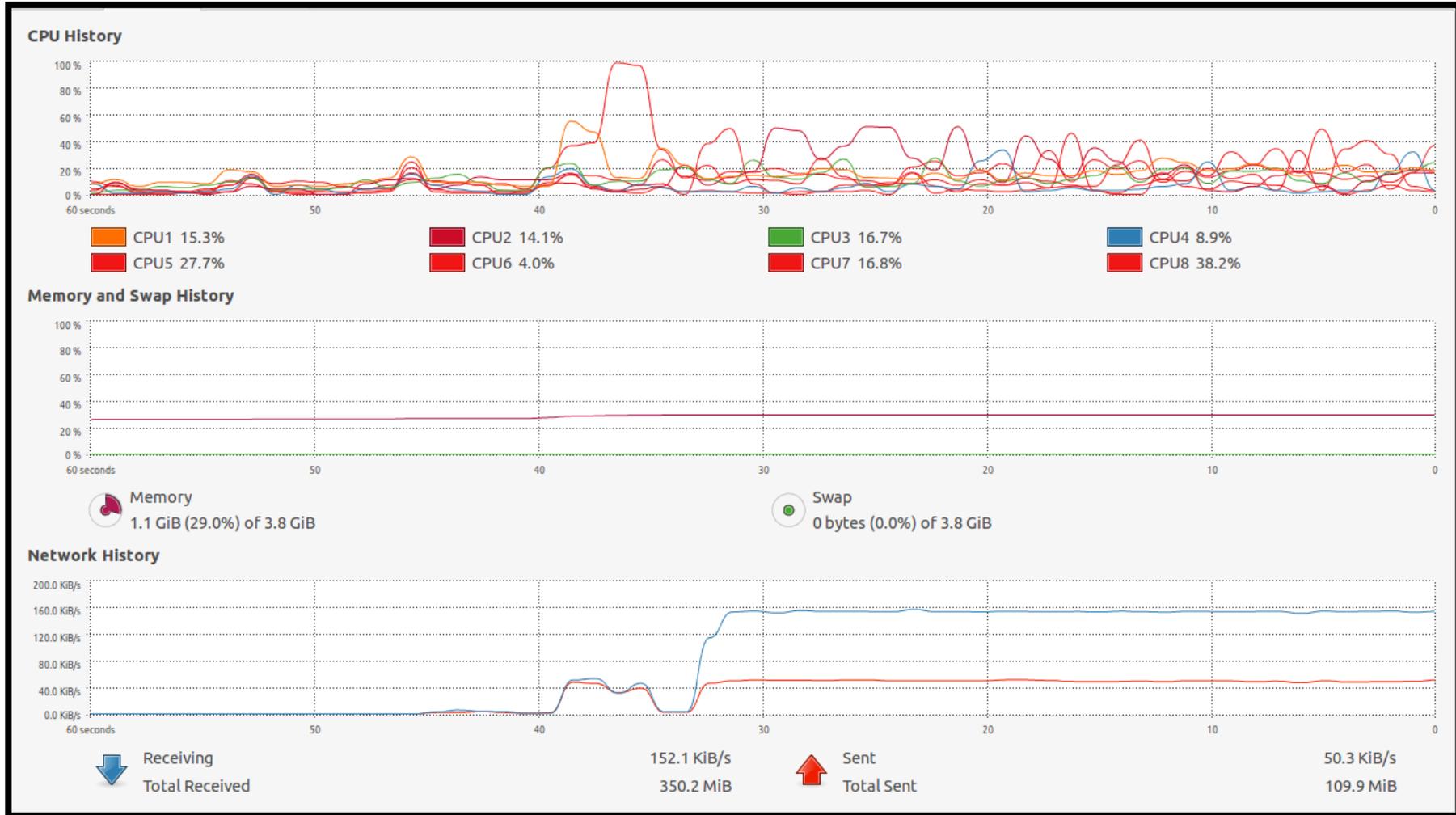


Figura 134 Uso CPU de máquina principal

El sistema Ubuntu tiene una herramienta de visualización gráfica llamada “system monitor” la cual nos indica los usos del CPU, el uso de memoria y el ancho de banda utilizado en la transición de datos.

Se puede observar en la Figura 134 que de la mitad hacia atrás se indica el estado de uso del CPU antes de iniciar el sistema ROS con sus respectivos nodos y de a mitad hacia adelante se indica el estado una vez que se inicia el sistema ROS.

En la primera parte se observa un uso inferior al 20% del CPU mientras que en la segunda parte se observa un uso variante del CPU con picos que se acercan al 50%. Por lo que se concluye que la máquina principal funciona correctamente sin ser sobrecargada.

El uso de memoria es aproximadamente del 30% con una varianza mínima cuando se inicializa el sistema ROS. Por el contrario el uso de ancho de banda tiene un cambio significativo que aumenta desde 0 KiB/s hasta 160 KiB/s para datos recibidos y de 0 KiB/s hasta 50 KiB/s para datos enviados.

#### **4.6.2 Máquina inercial**

Esta máquina cuenta con UbiLinux como SO el cual está encargado de correr el nodo de adquisición de datos y el nodo del filtro complementario, para enviar e resultado de los sensores inerciales a la maquina principal.

Se puede evaluar el uso del CPU que los nodos requieren utilizando el comando “top”. Se puede observar en la Figura 135 en el recuadro rojo superior, el tiempo de funcionamiento desde su encendido hasta el agotamiento de su batería mientras se ejecutan los nodos de ROS, el tiempo es 3 horas con 21 minutos. Por lo que se puede asegurar que las unidades inerciales cuentan con tres horas de autonomía, también se ha medido el tiempo que se demora en cargar, el cual el de 45 minutos aproximadamente cuando la carga está totalmente agotada.

En el recuadro rojo inferior se observa el uso del CPU que utiliza los nodos: “imu\_01\_node”, que es de 6.6% y “complementary\_filter”, de 4.9%.

```

top - 01:55:11 up 3:21, 3 users, load average: 0.34, 0.33, 0.37
Tasks: 114 total, 1 running, 113 sleeping, 0 stopped, 0 zombie
%Cpu(s):  2.8 us,  4.2 sy,  0.0 ni, 91.0 id,  0.0 wa,  1.7 hi,  0.3 si,  0.0 st
KiB Mem:  983516 total,  171360 used,  812156 free,  31480 buffers
KiB Swap:   0 total,   0 used,   0 free,  75676 cached

  PID USER      PR  NI  VIRT  RES  SHR  S  %CPU  %MEM    TIME+  COMMAND
 5938 root        20   0 65340 6224 5468 S   6.6   0.6   0:04.41 imu_01_node
 5939 root        20   0 67688 7132 6344 S   4.9   0.7   0:03.35 complementary_f
 5948 edison     20   0 4428 1380 1024 R   1.3   0.1   0:00.71 top
   378 root       -2   0   0     0     0 S   0.3   0.0   0:16.13 dhd dpc
 5892 root        20   0   0     0     0 S   0.3   0.0   0:00.18 kworker/0:0
 5920 root        20   0 42356 11m 3264 S   0.3   1.2   0:01.82 roslaunch
    1 root        20   0 2200  720  616 S   0.0   0.1   0:01.09 init
    2 root        20   0   0     0     0 S   0.0   0.0   0:00.01 kthreadd
    3 root        20   0   0     0     0 S   0.0   0.0   0:00.30 ksoftirqd/0
    5 root         0  -20   0     0     0 S   0.0   0.0   0:00.00 kworker/0:0H
    6 root        20   0   0     0     0 S   0.0   0.0   0:00.43 kworker/u4:0
    7 root        rt   0   0     0     0 S   0.0   0.0   0:00.06 migration/0
    8 root        20   0   0     0     0 S   0.0   0.0   0:00.69 rcu_preempt
    9 root        20   0   0     0     0 S   0.0   0.0   0:00.00 rcu_bh
   10 root        20   0   0     0     0 S   0.0   0.0   0:00.00 rcu_sched
   11 root        rt   0   0     0     0 S   0.0   0.0   0:00.06 watchdog/0
   12 root        rt   0   0     0     0 S   0.0   0.0   0:00.07 watchdog/1

```

**Figura 135** Uso CPU de máquina Inercial

Se puede apreciar de esta prueba que el procesador Intel Edison es de muy buenas prestaciones ya que ejecuta los nodos de ROS utilizando bajos recursos computacionales.

#### 4.6.3 Máquina robot

Esta máquina está encargada de correr el nodo de control PWM, el cual recibe la información desde la maquina principal.

Se puede evaluar el uso del CPU que el nodo requiere utilizando el comando “top”. En el recuadro rojo se observa el uso del CPU que utiliza el nodo “motors\_pwm\_node”, que es de 4%.

```

top - 00:48:38 up 48 min, 1 user, load average: 0.23, 0.10, 0.07
Tasks: 108 total, 1 running, 107 sleeping, 0 stopped, 0 zombie
%Cpu(s): 0.5 us, 1.2 sy, 0.0 ni, 96.4 id, 0.0 wa, 1.9 hi, 0.0 si, 0.0 st
KiB Mem:  983516 total, 112060 used, 871456 free, 16116 buffers
KiB Swap:  0 total, 0 used, 0 free, 49012 cached

  PID USER      PR  NI  VIRT  RES  SHR  S  %CPU  %MEM    TIME+  COMMAND
 2094 root        20   0 66520 6332 5568 S   4.0   0.6   0:03.97 motors_pwm_node
 2168 edison     20   0  4432 1380 1024 R   1.0   0.1   0:00.87 top
 2076 root        20   0 42352 11m 3264 S   0.3   1.2   0:01.87 roslaunch
 2101 edison     20   0  9216 1636 1036 S   0.3   0.2   0:00.05 sshd
   1 root        20   0  2200  724  616 S   0.0   0.1   0:00.97 init
   2 root        20   0     0     0     0 S   0.0   0.0   0:00.00 kthreadd
   3 root        20   0     0     0     0 S   0.0   0.0   0:00.18 ksoftirqd/0
   5 root        0 -20     0     0     0 S   0.0   0.0   0:00.00 kworker/0:0H
   6 root        20   0     0     0     0 S   0.0   0.0   0:00.32 kworker/u4:0
   7 root        rt    0     0     0     0 S   0.0   0.0   0:00.02 migration/0
   8 root        20   0     0     0     0 S   0.0   0.0   0:00.06 rcu_preempt
   9 root        20   0     0     0     0 S   0.0   0.0   0:00.00 rcu_bh
  10 root        20   0     0     0     0 S   0.0   0.0   0:00.00 rcu_sched
  11 root        rt    0     0     0     0 S   0.0   0.0   0:00.14 watchdog/0
  12 root        rt    0     0     0     0 S   0.0   0.0   0:00.04 watchdog/1
  13 root        rt    0     0     0     0 S   0.0   0.0   0:00.02 migration/1
  14 root        20   0     0     0     0 S   0.0   0.0   0:00.14 ksoftirqd/1

```

**Figura 136 Uso CPU de máquina Robot**

Así como en las Maquinas Iniciales se puede apreciar de esta prueba que el procesador Intel Edison es de muy buenas prestaciones ya que ejecuta el nodo PWM de ROS utilizando muy pocos recursos computacionales.

## 4.7 PRUEBA DE FRECUENCIAS

La interacción en ROS entre nodos y topics se puede observar en la Figura 137, se muestra principalmente las estadísticas de frecuencia práctica obtenidas en tiempo real, estas tienen una variación máxima medida por ROS de 59.9Hz a 60.1Hz lo que indica que se cumple la frecuencia teórica de 60Hz elegida.

Cabe destacar que la frecuencia elegida para la transmisión entre el nodo del sensor Flex y el nodo de control PWM es de 30Hz elegidos por tener un menor requerimiento. De igual manera se observa una variación máxima de  $\pm 0.1$ Hz.

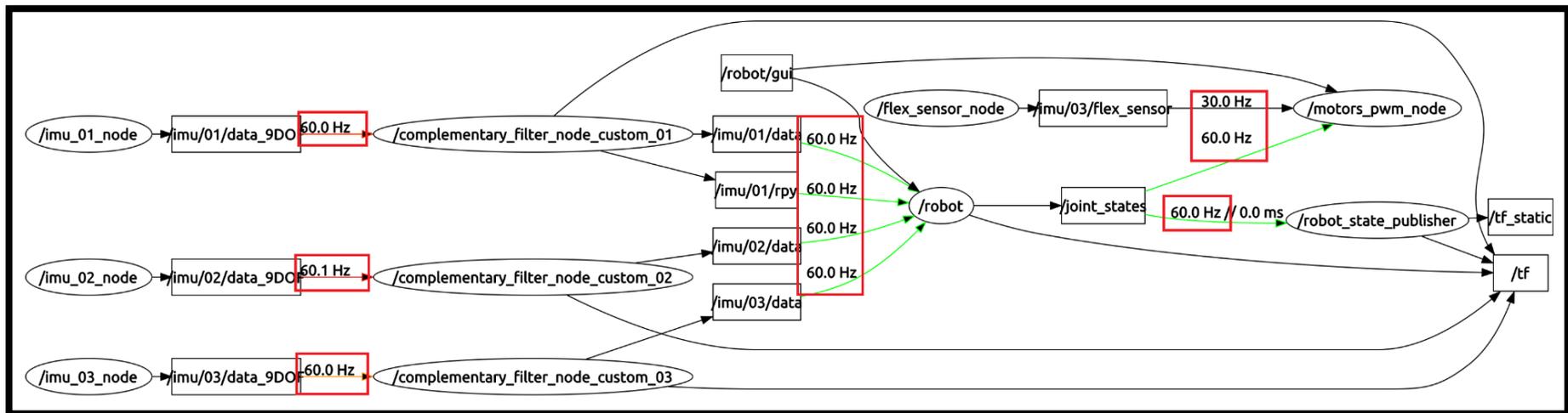


Figura 137 Estadísticas frecuencias nodos y topics

## 4.8 COSTOS DEL PROYECTO

En la Tabla 38 se detalla la lista de materiales; elementos mecánicos, electrónicos y demás utilizados en la implementación del proyecto, además se determina el costo total del mismo, incluyendo el valor de ingeniería.

**Tabla 38**  
**Costos del proyecto**

LISTA DE MATERIALES				
N.º DE ELEMENTO	N.º DE PIEZA	PRECIO UNITARIO	CANTIDAD	PRECIO TOTAL
1	Round Base A 585438	6,99	1	6,99
2	90° Quad Hub Mount C 545360	5,99	7	41,93
3	1.50 pulg Aluminum Channel 585440	2,99	1	2,99
4	3.00 pulg Aluminum Channel 585442	3,99	2	7,98
5	4.50 pulg Aluminum Channel 585444	4,99	3	14,97
6	9.00 pulg Aluminum Channel 585450	7,99	1	7,99
7	Serbo Gearbox Ensamble HS-5685MH (2:1 ratio)	109,98	1	109,98
8	Serbo Gearbox Ensamble HS-5685MH (3:1 ratio)	109,98	1	109,98
9	Serbo Gearbox Ensamble HS-5685MH (3.8:1 ratio)	109,98	2	219,96
10	SPT200	26,99	3	80,97
11	HS-5495BH Servo Hitec	27,99	3	83,97
12	1/4 plg 632106	1,69	3	5,07
13	5/16 plg 632108	1,79	1	1,79
14	1/2 plg 632114	2,19	1	2,19
15	1 plg 632124	3,19	1	3,19
16	1/2 plg Hub Spacer 545384	1,59	1	1,59
17	90° Quad Hub Mount B 545424	4,99	1	4,99
18	7/64 plg Hex Keys 7122A17	0,89	1	0,89
19	7/64 plg Hex Keys 57185A44	1,49	1	1,49
20	IMU INTEL EDISON	34,94	3	104,82
21	FUENTE 7,4V	30	1	30
22	Intel® Edison Hardware	2,95	3	8,85
23	Intel® Edison	49,95	3	149,85
24	SparkFun Block for Intel® Edison - I2C	14,95	1	14,95

Continúa 

25	SparkFun Block for Intel® Edison - Battery	24,95	2	49,9
26	SparkFun Block for Intel® Edison - PWM	19,95	1	19,95
27	SparkFun Block for Intel® Edison - ADC	19,95	1	19,95
28	SparkFun Starter Pack for Intel® Edison	119,95	1	119,95
29	Flex Sensor 2.2	7,95	1	7,95
30	Wall Adapter Power Supply - 5V DC 2A	5,95	1	5,95
SUBTOTAL 1				1241,03
VALOR INGENIERIA				
HORAS EFECTIVAS DE TRABAJO		450	15	6600
SUBTOTAL 2				6600
TOTAL				7841,03

MTw Development Kit es un sistema de captura de movimiento que incluye: 3 unidades inerciales, estación Awinda Wifi de comunicación, un cable USB para la estación Awinda, un cargador para estación Awinda, caja de almacenamiento y software de control (Xsens, MTw Development Kit, 2014). El kit de desarrollo “XSENS MTI-10-2A5G4-DK DEV” que incluye una sola unidad inercial cuesta 1723.75 USD, aproximadamente el kit de desarrollo con tres unidades inerciales se estima que esta or encima de 4000.00 USD.



**Figura 138 MTw Development Kit de Xsens**  
 Fuente: (Xsens, MTw Development Kit, 2014)

En el presente Proyecto se ha desarrollado un kit para captura de movimiento con tres unidades inerciales con un precio total de 532.12 US, lo cual es sustancialmente inferior a lo que se estima que sería el precio de producción de kit de Xsens.

Suponiendo que el costo de producción de este kit sea la mitad del precio de venta, se estima un precio de producción de 2000.00 USD, representa aproximadamente cuatro veces el costo de producción el sistema de captura de movimiento desarrollado en el presente proyecto.

**Tabla 39**  
**Especificaciones Robot**

<b>Especificaciones</b>	
<b>Nombre</b>	HAR01
<b>Peso</b>	11 kg
<b>Longitud del brazo</b>	659 mm
<b>Velocidad máxima</b>	45 grad/s
<b>Tiempo de funcionamiento IMU</b>	3 horas
<b>Tiempo de carga IMU</b>	1 hora
<b>Sistema operativo</b>	ROS
<b>Comunicación</b>	wifi
<b>Voltaje</b>	110 VAC
<b>Potencia</b>	1500 W

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### CONCLUSIONES

- Se ha realizado el diseño y construcción del brazo robótico teleoperado con un sistema de captura de movimiento inercial. Mediante la implementación de un controlador de movimiento que detecta la orientación de los miembros que componen el brazo humano para dirigir el movimiento del manipulador robótico de 7 GDL en tiempo real.
- Se ha logrado evaluar el correcto funcionamiento del sistema de captura de movimiento mediante un prototipo didáctico y funcional de un brazo robótico humanoide. Debido a esto se ha diseñado y seleccionado los elementos necesarios para la construcción del brazo robótico, utilizando una plataforma de construcción robótica modular llamada Actobotics.
- Se ha realizado el modelamiento y simulación del sistema mecánico del robot utilizando el software basado en diagramas de bloques, ya que mediante la utilización de estos se simplifica el proceso de modelamiento.
- En telerobótica la retroalimentación y corrección del movimiento del robot es realizada de forma manual por el operador humano, por lo que la operación del robot funciona mediante el uso de un controlador de movimiento en lazo abierto.
- Se logró desarrollar e implementar una interfaz gráfica amigable con el usuario con las herramientas de la plataforma ROS para el control del brazo robótico, que también permite la teleoperación manual y simulación gráfica para visualización de estado del robot.
- Tomando en cuenta el costo de implementación del sistema de captura de movimiento inercial se ha logrado competir con otros sistemas que

se comercializan actualmente. A pesar de reducir el costo significativamente, no se han visto pérdidas en características importantes de tamaño reducido y funcionamiento de forma inalámbrica.

## RECOMENDACIONES

- Se recomienda realizar una segunda etapa complementaria del proyecto, donde se implemente el sistema de captura de movimiento en un prototipo robótico mejorado, de acuerdo a la ampliación de características mecánicas y estéticas que vuelvan al robot más robusto para su aplicación en un ambiente industrial.
- Implementar un segundo brazo del robot y ampliar el sistema de captura de movimiento correspondiente. De esta forma se lograría el seguimiento en tiempo real de los dos brazos de un operador humano para el uso del sistema robótico en tareas de mayor complejidad donde se necesite el uso de dos brazos simultáneamente.
- Añadir el prototipo robótico en un robot móvil existente, o bien se diseñe un robot móvil específico para esta tarea, el cual le permita desplazarse o movilizarse hacia ambientes remotos, con el fin de evaluar su uso y aplicación en ambientes peligrosos situados en localidades distantes al operador.
- Tomar el manipulador robótico humanoide de 7GDL y adaptarlo a un ambiente industrial mediante un lenguaje de programación robótico para poder evaluar características como: resolución espacial, exactitud y repetibilidad en el desempeño del sistema robótico.
- Se recomienda adaptar e implementar el sistema de captura de movimiento desarrollado, en un robot didáctico o industrial de diferente configuración morfológica, para que se pueda ampliar su aplicación y evaluar ventajas y desventajas de su uso en otros tipos de robots.

## BIBLIOGRAFÍA

- Adafruit. (2013). *Adafruit*. Recuperado el 02 de Noviembre de 2015, de Long Flex/Bend sensor.
- Anatomía. (2012). *Anatomía teórica*. Recuperado el 20 de Octubre de 2015, de Anatomía 1 Miembro Superior e Inferior: <http://anatomiateorica1marilu.blogspot.com/2012/01/anatomia-1-miembrosuperior-e-inferior.html>
- Angulo, J. M. (2005). *Introduccion a la robotica*. Madrid, España: Thomson.
- Banda2cero. (2014). *banda2cero*. Recuperado el 02 de Noviembre de 2015, de Robots de servicio para uso personal y privado: <https://banda2cero.wordpress.com/2014/07/08/robots-de-servicio-para-uso-personal-y-privado/>
- Barrientos, A., Peñin, L., Balaguer, C., & Aracil, R. (2011). *FUNDAMENTOS DE ROBOTICA*. España: McGraw-Hill.
- Biologiafotos. (2011). *Dibujos Imágenes Biología*. Recuperado el 20 de Octubre de 2015, de Dibujo de la extremidad superior del cuerpo humano: <http://biologiafotosdibujosimagenes.blogspot.com/2011/09/dibujo-de-laextremidad-superior-del.html>
- Biomecánica del miembro superior*. (2011). Recuperado el 20 de Octubre de 2015, de Planos y ejes de movimiento: <http://upperlimbbiomechanics.blogspot.com/2011/06/planos-y-ejes-de-movimiento.html>
- Blake, R. (2004). *Sistemas electrónicos de comunicaciones*. Mexico: Thomson.

- Chen, J., Hass, E., & Barnes, M. (Noviembre de 2007). Human Performance Issues and User Interface Design for Teleoperated Robots. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Applications and Reviews*.
- ERM. (2013). *Erm*. Recuperado el 02 de Noviembre de 2015, de Robot Humanoide NAO: <http://www.erm-automatismes.com/p181-es-robot-humanoide-nao.html>
- Frenzel, L. E. (2003). *Sistemas electrónicos de comunicaciones*. Mexico: Alaomega.
- García, A. (2011). Estado de arte sistemas de captura de movimiento en 3D aplicados en entrenamiento virtual en tiempo real. Santiago de Cali, Colombia: Univesidad Autónoma de Occidente.
- Gómez, J., Ollero, A., & García, A. (2006). Teleoperación y Telerrobótica. Madrid, España: Pearson Educación S.A.
- Groves, P. (2007). *Principles of GNSS, Inertial, and Multisensor Integrated Navigation Systems*. Londres: Artech House.
- Herrera, E., & Zambrano, W. (2013). Diseño e implementación de un guante sensorizado para el control teleoperado de un prototipo de brazo robótico para aplicaciones de manejo de materiales peligrosos. Latacunga, Ecuador. Recuperado el 02 de Septiembre de 2015, de <http://repositorio.espe.edu.ec/bitstream/21000/7195/1/T-ESPEL-MEC-0013.pdf>
- Intel. (2014). *Intel*. Recuperado el 05 de Noviembre de 2015, de Intel® Edison: <http://www.intel.es/content/www/es/es/do-it-yourself/edison.html>
- Khwaja, H. (2013). Flex Sensor Combined. Recuperado el 20 de Agosto de 2015, de <http://mech207.engr.scu.edu/SensorPresentations/Jan - Flex Sensor Combined.pdf>

- Kim, S., Kim, C., & Park, J. (2009). Human-like Arm Motion Generation for Humanoid Robots Using Motion Capture Database. Intelligent Robotics Research Center.
- Kitagawa, M., & Windsor, B. (2008). MoCap for Artists Workflow and Techniques for Motion Capture.
- kuka. (2014). *kuka*. Recuperado el 02 de Noviembre de 2015, de KR 6 R700 fivve (KR AGILUS): [http://www.kuka-robotics.com/es/products/industrial\\_robots/small\\_robots/kr6\\_r700\\_fivve/start.htm](http://www.kuka-robotics.com/es/products/industrial_robots/small_robots/kr6_r700_fivve/start.htm)
- López, R. (2009). *Arcos y ángulos de movimiento*. Recuperado el 20 de Octubre de 2015, de <http://www.slideshare.net/pedroespinoza106/52756563-angulosyarcosdemovimiento>
- Madgwick, S. (30 de Abril de 2010). An efficient orientation filter for inertial and inertial/magnetic sensor arrays.
- MoCap. (s.f.). *MoCap*. Recuperado el 13 de Agosto de 2015, de Sabia Web site: <http://sabia.tic.udc.es/gc/Contenidos%20adicionales/trabajos/Peliculas/Mocap/tecnol.htm>
- Motion, O. (2011). *Markerless Mocap for Animation*. Recuperado el 13 de Agosto de 2015, de Organic Motion: <http://www.organicmotion.com/solutions/openstage>
- Perales, F. (s.f.). Human Motion Analysis & Synthesis using Computer Vision and Graphics Techniques. *State of Art and Applications*.
- Reyes, F. (2011). Robotica control de robots manipuladores. Mexico: Alfaomega.
- Robotnik. (2013). *Robotnik*. Recuperado el 02 de Noviembre de 2015, de Summit XL: <http://www.robotnik.es/videos/>

- Secretaria de Educación Superior. (2013). *Objetivos*. Recuperado el 20 de Agosto de 2015, de Secretaria de Educación Superior, Ciencia, Tecnología e Innovación: <http://www.educacionsuperior.gob.ec/objetivos/>
- Stanton, C., Bogdanovych, A., & Ratanasena, E. (2012). Teleoperation of a humanoid robot using full-body motion capture, example movements, and machine learning., (págs. 3-5). Australia.
- Superrobotica. (2012). *superrobotica*. Recuperado el 05 de Noviembre de 2015, de SERVO MOTOR HITEC HS422 S330165: <http://www.superrobotica.com/S330165.htm>
- Tecnomagazine. (2011). *Tecnomagazine*. Recuperado el 02 de Noviembre de 2015, de ASIMO: <http://tecomagazine.net/2011/11/09/asimo-el-nuevo-robot-humanoide-inteligente-de-honda/>
- Torres, F., Pomares, J., Gil, P., & Puente, S. (2002). *Robots Y Sistemas Sensoriales. 2*. Madrid, España: Prentice Hall.
- Ulrich, K. T. (2013). *Diseño y desarrollo de productos*. McGRAW-HILL.
- Valenti, R., Dryanovski, I., & Xiao, J. (6 de Agosto de 2015). Keeping a Good Attitude: A Quaternion-Based Orientation Filter for IMUs and MARGs.
- Vicon. (2011). *Motion Capture*. Recuperado el 13 de Agosto de 2015, de Vicon: <http://www.vicon.com/what-is-motion-capture>
- Vigouroux Cavolina, D. (10 de 2010). Implementación de unidad de mediciones inerciales (IMU) para robótica utilizando filtro de Kalman. Sartenejas, Venezuela.
- Wikipedia. (2011). *Biomecánica del miembro superior*. Recuperado el 20 de Octubre de 2025, de Planos y ejes de movimiento: <http://upperlimbbiomechanics.blogspot.com/2011/06/planos-y-ejes-demovimiento.html>

Xsens. (2014). *MTw Development Kit*. Recuperado el Febrero de 2016, de MTw Development Kit: <https://www.xsens.com/products/mtw-development-kit/>

Xsens. (s.f.). *Captura de Movimiento*. Recuperado el 13 de Agosto de 2015, de Xsens Web site: <http://xsens.es/empresa/aspectos-de-la-industria/motion-capture.php>

Zavala, D. (2010). *La transformación del género documental*. Puebla, México: Universidad de las Américas Puebla.