



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE PUEBLA

Programa Académico de Posgrado

**Teleoperación de un brazo robótico de
5 grados de libertad mediante la
instrumentación del brazo humano**

TESIS
QUE PARA OBTENER EL GRADO DE

**MAESTRÍA EN INGENIERÍA EN
AUTOMATIZACIÓN DE PROCESOS
INDUSTRIALES**

PRESENTA:
Martín Alberto Coca Paez

DIRECTOR
Dr. Antonio Benitez Ruiz



Juan C. Bonilla, Puebla, México, Enero 2017.

El presente trabajo fue realizado en la Universidad Politécnica de Puebla, ubicada en Tercer carril del Ejido "Serrano" S/N, San Mateo Cuanalá, Municipio Juan C. Bonilla, Puebla CP 72640.

Apoyo del CONACYT, Beca No. 634646, Programa de Maestría perteneciente al Programa Nacional de Posgrados de Calidad (PNPC-CONACYT).



CONACYT

Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología

En memoria de mis abuelos paternos:

Blanca Lilia y Jorge

Agradexco a la Universidad Politécnica de Puebla a la Dirección de Posgrado al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por la beca otorgada y a mis compañeros de Posgrado por la convivencia y el apoyo brindados.

Índice General

ÍNDICE GENERAL	I
ÍNDICE DE FIGURAS	V
NOMENCLATURA.....	VII
RESUMEN.....	viii
ABSTRACT	viii
CAPÍTULO 1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN.....	1
1.1 Introducción	1
1.2 Objetivo general.....	2
1.2.1.1 Objetivos específicos.....	2
1.3 Justificación	3
CAPÍTULO 2 CONCEPTOS ELEMENTALES.....	4
2.1 Origen de la robótica.....	5
2.2 Morfología del robot	6
2.2.1 Estructura mecánica de un robot	6
2.3 Transmisiones y reductores	8
2.3.1 Transmisiones.....	8
2.3.2 Reductores.....	9
2.3.3 Accionamiento directo	10
2.4 Actuadores	11
2.4.1 Actuadores neumáticos	11
2.4.2 Actuadores hidráulicos	11
2.4.3 Actuadores eléctricos	11
2.5 Sensores empleados en la robótica	12
2.6 Cinemática del robot manipulador	13
2.6.1 Modelo cinemático directo	14
2.6.2 Modelo cinemático inverso	18
2.7 Anatomía del brazo humano y sus movimientos.....	20
2.7.1 Movimientos del brazo humano	21
2.7.1.1 Movimientos en la cintura escapular y en la articulación del hombro.....	21
2.7.1.2 Movimientos en la articulación del codo.....	23

2.7.1.3	Movimientos en las articulaciones de la mano y de los dedos	24
2.8	Teleoperación	26
2.8.1	Teleactuación	27
2.8.2	Diseño de sistemas de control de teleoperación	28
2.8.3	Teleprogramación e interacción con el entorno.....	29
2.8.4	Control de supervisión.....	29
2.8.5	Telesensorización.....	30
2.8.6	Trabajos relacionados	31
CAPÍTULO 3	INSTRUMENTACIÓN	33
3.1	Transductores, sensores y accionamientos	33
3.1.1	Tipos de sensores	34
3.1.2	Acondicionamiento y presentación	38
3.1.3	Interfaces, dominios de datos y conversiones	38
3.2	Galgas extensiométricas.....	40
3.3	Microacelerómetros	45
3.3.1	Microacelerómetro piezoeléctrico.....	46
3.4	Microgiroscopios	48
3.4.1	Giroscopios de velocidad vibratoria micromecanizada	48
3.5	Dispositivos de instrumentación utilizados para la captura de movimiento	50
3.5.1	Tarjeta de control de los servomotores.....	50
3.5.2	Etapas de potencia de la tarjeta de control.....	52
3.5.3	Sistema embebido	52
3.5.4	Características técnicas de los sensores empleados en la instrumentación	54
CAPÍTULO 4	DESARROLLO	57
4.1	Diseño del soporte para el robot manipulador.....	58
4.1.1	Construcción del soporte del robot.....	61
4.2	Cálculo del modelo cinemático	62
4.3	Programación en mbed para la cinemática directa.....	66
4.4	Instrumentación para la captura de movimiento	68
4.4.1	Instrumentación de un guante para la captura de movimiento	68
4.4.2	Adaptación del potenciómetro al codo	69
4.4.3	Instrumentación del brazo para la captura del movimiento.....	70
4.4.1.1	Instrumentación completada para la teleoperación.....	71
4.5	Programación de la teleoperación del brazo robótico	71

CAPÍTULO 5 RESULTADOS	74
5.1 Modelo cinemático directo del robot de 5 GDL	74
5.1.1 Rangos de movilidad y restricciones del manipulador.....	75
5.2 Instrumentación del dispositivo de captura de movimiento para la teleoperación del brazo robótico	77
5.2.1 Instrumentación del guante.....	78
5.2.2 Instrumentación del codo.....	79
5.2.3 Instrumentación del brazo	80
5.3 Programar la teleoperación al brazo robótico de 5 GDL	81
5.3.1 Análisis del retardo en la teleoperación.....	83
CAPÍTULO 6 CONCLUSIONES	85
6.1 Trabajos a futuro	85
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	86
ANEXOS.....	90

Índice de Tablas

Tabla 1. Sistemas de transmisión para robots.....	9
Tabla 2. Características de reductores para robótica	9
Tabla 3. Características de los distintos tipos de actuadores para robots.	12
Tabla 4. Principales variables físicas en la robótica.	12
Tabla 5. Parámetros D-H para el robot cilíndrico	17
Tabla 6. Clasificaciones de los sensores (Pallás, 2005).....	36
Tabla 7. Sensores y métodos de detección ordinarios para las magnitudes más frecuentes	37
Tabla 8. Especificaciones de los servomotores del manipulador	58
Tabla 9. Servomotores del brazo robótico modificado	62
Tabla 10. Parámetros del algoritmo D-H para el manipulador.....	64
Tabla 11. Valores en PWM designados al controlador para su posicionamiento.....	67
Tabla 12. Análisis de retraso en la teleoperación.....	84

Índice de Figuras

Figura 2.1 Distintos tipos de articulaciones para robots	7
Figura 2.2 Configuraciones más frecuentes en robots industriales.....	7
Figura 2.3 Grados de libertad del robot ARC Mate 120iC/10C de Fanuc.....	8
Figura 2.4 Diagrama de relación entre la cinemática directa e inversa	13
Figura 2.5 Robot planar de dos grados de libertad.	15
Figura 2.6 Parámetros D-H para un eslabón giratorio.....	16
Figura 2.7 Robot cilíndrico.....	17
Figura 2.8 Partes que conforman el miembro superior (brazo humano).....	20
Figura 2.10 Ritmo escapulohumeral.	23
Figura 2.11 Amplitud de movimiento de las articulaciones humerorradial y humerocubital de la articulación del codo.	23
Figura 2.12 Movimiento y ejes de movimiento de las articulaciones proximal y distal de la muñeca	24
Figura 2.13 Amplitud de movimiento de las articulaciones de los dedos.	25
Figura 2.14 Esfera de control.	27
Figura 3.1 Dominios de datos.....	39
Figura 3.2 Relación entre esfuerzos y deformaciones. La escala de la zona elástica está muy ampliada.	41
Figura 3.3 Parámetros de una galga impresa (BLH Electronics). 1.....	43
Figura 3.4 Montaje de una galga impresa (BLH Electronics).	44
Figura 3.5 Ilustración de algunas de las aplicaciones de los microacelerómetros en la industria automotriz (Chaehoi, 2005).	45
Figura 3.6 Estructura básica de un microacelerómetro piezoeléctrico.....	47
Figura 3.7 Estructura de un microacelerómetro piezoeléctrico tipo viga en voladizo (DeVoe y Pisano, 2001).....	47
Figura 3.8 Datos de giroscopio micromecanizado, diseñados y fabricados en Laboratorio de microsistemas UCI. Cortesía de Alexander A. Trusov.	49
Figura 3.9 Un chip de giroscopio MEMS empaquetado. La estructura tridimensional de la microescala se forma de un solo cristal de sustrato del silicio, completo con las masas de prueba móviles, vigas de la suspensión, actuadores y detectores.	49
Figura 3.10 Estructura interna del MEM MPU6050.	50
Figura 3.11 Tarjeta de control para los servomotores del manipulador.	51
Figura 3.12 Puerto de comunicación serial UART de la tarjeta de control.	51
Figura 3.13 Etapa de potencia para la tarjeta de control del manipulador.....	52
Figura 3.14 Sistema embebido utilizado en este proyecto NUCLEO-F446RE.....	53
Figura. 3.15 Dimensiones de la galga extensiométrica	55
Figura. 3.16 Flexión de la galga extensiométrica.	55
Figura. 3.17 Giroscopio-acelerómetro MPU-6050.	56
Figura 4.1 Procedimiento a seguir para el desarrollo del proyecto.....	57
Figura. 4.2 a) Robot manipulador de 5 GDL b) Postura que adoptara el manipulador para asemejarse al brazo humano.	58

Figura. 4.3 Medidas de la base del robot manipulador de 5 GDL (los valores son dados en milímetros).....	59
Figura. 4.4 Diseño CAD del soporte del robot.....	59
Figura 4.5 Medidas de las piezas que conforman el soporte de la base del robot y el ajustador con intersecciones para adaptar al manipulador en su área de trabajo (las medidas están en milímetros).....	60
Figura 4.6 Medidas de la base para el soporte del manipulador de 5 GDL (las medidas están en milímetros).....	61
Figura. 4.7 Robot manipulador de 5 GDL colocado en el soporte diseñado y construido para este proyecto.	61
Figura. 4.8 Características geométricas de cada eslabón.....	64
Figura. 4.9 Conexiones necesarias para efectuar la programación del modelo cinemático directo.....	66
Figura 4.10 Semejanzas entre la mano humana y el robot, a) garra del robot≈dedos, b) cuarta articulación≈muñeca, c) giro de la mano≈quinta articulación.	68
Figura 4.11 Guante instrumentado para la teleoperación del manipulador.	69
Figura. 4.12 Potenciómetro instrumentado en el codo para el control del movimiento angular de la tercera articulación del robot.	70
Figura 4.13 MPU6050 para la captura de movimiento del brazo colocado en su soporte.	70
Figura. 4.14 Instrumentación para la captura de movimiento necesaria en la teleoperación.	71
Figura 4.15 Conexiones necesarias para contar con la interfaz entre el brazo y el manipulador para la teleoperación.....	72
Figura 5.1 El efector final del manipulador alcanza la posición calculada por el programa la cual se puede apreciar en la hyperterminal de la computadora.	75
Figura 5.2 Rangos de movimiento para la segunda y tercera articulación del manipulador.....	75
Figura 5.3 Rango de movimiento para la base del robot y su cuarta articulación.	76
Figura 5.4 Similitudes de movimiento entre el humano y el robot.....	76
Figura 5.5 Limitaciones de los movimientos del brazo humano con respecto al robot....	77
Figura 5.6 Valor resistivo máximo y mínimo de la galga extensiométrica medido con un multímetro.....	78
Figura 5.7 Pruebas de movimiento angular al giroscopio/acelerómetro MPU6050.	79
Figura 5.8 Resistencia del potenciómetro a 90° y a 0°.....	79
Figura 5.9 Instrumentación para la captura de movimiento , el guante instrumentado con la galga extensiométrica y el sensor MPU6050 y también el brazo instrumentado con el otro sensor MPU6050.	80
Figura 5.10 Resultados obtenidos de la teleoperación de la muñeca mediante la instrumentación de la mano con una galga extensiométrica y un giroscopio MPU6050.....	82
Figura 5.11 Teleoperación del manipulador de 5 GDL mediante la instrumentación por captura de movimiento.....	83
Figura 5.12 Retraso en la teleoperación del robot, para esta prueba el retraso fue de 1.8 segundos.....	84

Nomenclatura

Art. Articulación.

Arts. Articulaciones

GDL Grados de libertad

D-H Denavit-Hartenberg

MEM's Sistemas Microelectromecánicos

Resumen

En el presente proyecto de tesis titulado "Teleoperación de un brazo robótico de cinco grados de libertad mediante la instrumentación del brazo", se emplea un manipulador de arquitectura abierta por lo cual se hace uso de la programación de sistemas embebidos para poder controlarlo y por lo tanto se emplea la instrumentación para poder teleoperar al robot mediante sensores implementados en el brazo humano con la finalidad de que el robot imite los movimientos del brazo humano salvo por algunas restricciones en la arquitectura del manipulador con la principal tarea de implementarlo en áreas que puedan ser un factor de riesgo para la salud y seguridad del hombre, por ejemplo en la manipulación de químicos, o en ambientes al vacío donde la presencia de oxígeno es nula.

Abstract

In this thesis project entitled "Teleoperation of a robotic arm five degrees of freedom by implementing the human arm " a manipulator of open architecture for which use is used programming embedded devices to control and therefore instrumentation to teleoperate the robot by sensors deployed in the human arm in order that the robot imitates movements except human arm by some restrictions on the architecture of the manipulator is used with the main task of implementing it in areas that may be a risk factor for human health and safety, for example in handling chemicals or in vacuum environments where the presence of oxygen is zero.

Capítulo 1 Planteamiento del problema de investigación

1.1 Introducción

La robótica está experimentando en la actualidad una notoria aplicación de sus campos de actuación, saturadas en cierta medida las aplicaciones del robot en talleres y líneas de fabricación. Buena parte de las definiciones y clasificaciones de robots existentes responden al robot ampliamente utilizado hasta la fecha, destinado a la fabricación flexible y que se conoce como “robot industrial” o robot de producción. Frente a éstos, los robots especiales, también denominados robots de servicio, están aún en estado de desarrollo incipiente, aunque es previsible un considerable desarrollo de los mismos (Barrientos et al., 2007).

Un componente importante de un sistema robótico es la adquisición, procesamiento e interpretación de la información provista por los sensores. Esta información es utilizada para derivar las señales de control para manejar un robot, tales como: posición, velocidad, fuerza, tacto o visión (Cid, 2015), la cual puede emplearse para crear una interfaz humano-robot, es decir que el robot sea manipulado por una de las extremidades del hombre por ejemplo el brazo.

La solución que se plantea en este proyecto es la manipulación de un brazo robótico de 5 grados de libertad el cual interprete los movimientos de un brazo humano mediante la instrumentación del mismo por medio de sensores (giroscopio, acelerómetro, galga extensiométrica etc.) con la finalidad de teleoperar al brazo robótico.

1.2 Objetivo general

Teleoperar un brazo robótico de 5 grados de libertad a través de la instrumentación del brazo humano.

1.2.1.1 Objetivos específicos

- Obtener el modelo cinemático del manipulador para determinar sus rangos de movilidad y las restricciones necesarias de su arquitectura
- Instrumentar el brazo humano para la teleoperación del manipulador
- Programar los algoritmos de locomoción del manipulador para imitar el movimiento del brazo humano

1.3 Justificación

La robótica representa un área de gran interés para el ser humano dada sus múltiples aplicaciones en la vida diaria. La presencia de robots en el entorno cubre un gran abanico de aplicaciones que van desde aspectos de salud, industria, hasta entretenimiento. Conforme se va dando la integración de robots en la vida, es cada vez más importante que la interacción humano-robot sea lo más natural para las personas (Chacón et. al., 2015).

Los sistemas de teleoperación permiten manipular objetos ubicados en ambientes distantes, que además pueden ser utilizados para ejecutar tareas complejas o peligrosas para los humanos. Entre las aplicaciones más comunes de los sistemas de teleoperación de robots se pueden encontrar: telecirugías, navegación y exploración espacial.

Estos desarrollos desembocaron finalmente en lo que se conoce sistemas de teleoperación maestro-discípulo, que básicamente se compone de tres elementos: un control maestro con el que el operador humano interactúa; un robot discípulo cuyo objetivo es ejecutar las órdenes del maestro; y un canal de comunicaciones que interconecta ambos dispositivos (Nuño, 2008).

Los robots pueden interactuar en ambientes con obstáculos, tanto estáticos como dinámicos, si es un ambiente conocido, es posible desarrollar trayectorias fijas que evadan obstáculos. Esto, resulta inútil cuando la información del área de trabajo es insuficiente o se trabaja en lugares cambiantes donde la trayectoria inicial es modificada constantemente y la planeación inicial ya no es aceptable. Para estos casos se propone un esquema de supervisión o teleoperación, para mantener el control del robot o bien para cambiar acciones o rutas, por lo tanto es necesario la intervención humana (Gómez, y Ollero, 2006).

El reto de este proyecto implica el uso del brazo humano instrumentado que permita el control de los movimientos de un robot de cinco grados de libertad, asimilando el movimiento natural del brazo humano es decir que el robot tendrá algunas restricciones de movimiento debido a que el brazo humano cuenta con un número mayor de grados de libertad, sin descartar las ventajas de este proyecto, ya que la mayoría de los robots son programados para realizar tareas repetitivas y esto a veces resulta más complicado, ya que la programación se vuelve más compleja si se requiere que el robot ejecute una o varias tareas con un grado de dificultad elevado, lo cual se realizaría de una manera más fácil si el robot es manipulado por un humano.

Este proyecto se propone como un inicio en la rama de la teleoperación robótica que permitirá continuar con la experimentación en esta área de interés ya que puede aplicarse por mencionar ejemplos: para la manipulación de sustancias químicas peligrosas para el hombre, y también para la manipulación de bacterias en entornos con poca o nula oxigenación, etc.

Capítulo 2 Conceptos elementales

El contenido del marco teórico involucra los principales temas para la realización de este proyecto; el cual se compone de cuatro secciones: la primera da una breve introducción a la robótica, en la segunda se explica la anatomía del brazo humano y sus movimientos. En la tercera sección se abordará la teleoperación del robot tema clave para este proyecto, y en la cuarta sección se habla acerca de los trabajos relacionados con el proyecto.

A lo largo de los años, la humanidad ha intentado reproducir algunas de sus características tales como el poder moverse o interactuar con el medio que lo rodea a través de objetos inanimados. Para conseguir tal objetivo, fue necesario implementar estructuras mecánicas constituidas por una serie de mecanismos simples como ruedas, poleas e incluso engranes. Sin embargo, con los nuevos avances en el campo de la electrónica y de manera particular referido a los circuitos integrados, han traído como consecuencia la creación de sistemas mecánicos cada vez más complejos, los cuales no sólo pueden reproducir algunos movimientos parecidos al de los humanos sino que además, han logrado sustituirle en procesos inteligentes como lo es la toma de decisiones.

2.1 Origen de la robótica

La palabra robot fue usada por primera vez en el año 1921, cuando el escritor checo Karel Capek (1890-1938) estrena en el teatro nacional de Praga su obra Rossum's Universal Robot (R.U.R.). Su origen es la palabra eslava rabota, que se refiere al trabajo realizado de manera forzada. Los robots de R.U.R. eran máquinas andróides fabricadas a partir de la "fórmula" obtenida por un brillante científico llamado Rossum. Estos robots servían a sus jefes humanos desarrollando todos los trabajos físicos, hasta que finalmente se rebelan contra sus dueños, destruyendo toda la vida humana, a excepción de uno de sus creadores, con la frustrada esperanza de que les enseñe a reproducirse.

Posteriormente, otro dramaturgo de origen ruso y dedicado a la escritura de ciencia ficción, llamado Isaac Asimov, concibe al robot como un artefacto mecánico de apariencia humana pero con ausencia de sentimientos. El término robótica es entonces introducido por Asimov como la ciencia encargada al estudio de los robots, basada en tres leyes fundamentales (Jazar, 2010).

1. Un robot no debe dañar a un ser humano, o por inacción, permitir que un ser humano sufra daño.
2. Un robot debe obedecer las órdenes dadas por los seres humanos, excepto cuando tales órdenes entren en conflicto con la primera ley.
3. Un robot debe proteger su propia existencia, siempre y cuando dicha protección no entre en conflicto con la primera o la segunda ley.

Estas leyes establecen reglas de conducta que son consideradas como especificaciones para el diseño de un robot, el cual desde entonces ha tenido la connotación de un producto industrial diseñado con técnicas especializadas.

El robot como máquina lleva una evolución diferente del término robot. Tras los primeros autómatas casi todos con aspecto o características humanas, los precursores más directos de los robots fueron los telemanipuladores. En 1948 R.C. Goertz del Argonne National Laboratory desarrolló, con el objetivo de manipular elementos radioactivos sin riesgo para el operador, el primer telemanipulador, el cual consistía en un dispositivo mecánico maestro-esclavo. El manipulador maestro, situado en la zona segura, era movido directamente por el operador, mientras que el esclavo, situado en contacto con los elementos radiactivos y unidos mecánicamente al maestro, reproducía fielmente los movimientos de éste.

Otro de los pioneros de la telemanipulación fue Ralph Mosher, ingeniero de la General Electric que en 1958 desarrolló un dispositivo denominado Handy-Man, el cual consistía en dos brazos mecánicos teleoperados mediante un maestro del tipo denominado exoesqueleto. Junto a la industria nuclear, a lo largo de los años sesenta la industria submarina comenzó a interesarse por el uso de los telemanipuladores. A este interés se sumó la industria espacial en los años setenta.

La evolución de los telemanipuladores a lo largo de los últimos años no ha sido tan espectacular como la de los robots. Recluidos en un mercado selecto y limitado (industria nuclear, militar, espacial, etc.) son en general desconocidos y

comparativamente poco atendidos por los investigadores y usuarios de robots. Por su propia concepción, un telemanipulador precisa del mando continuo de un operador, y salvo por las aportaciones incorporadas con el concepto de control supervisado y la mejora de la telepresencia promovida hoy en día por la realidad virtual, sus capacidades no han variado mucho respecto a las de sus orígenes (Barrientos et al., 2007).

Los futuros desarrollos de la robótica apuntan hacia aumentar su movilidad, destreza y autonomía de sus acciones. La mayor parte de los robots actuales son con base estática, y se utilizan en aplicaciones industriales tales como ensamblado, soldadura, alimentación de máquinas herramientas, etc. Sin embargo, existen otro tipo de aplicaciones que han hecho evolucionar en gran medida tanto la concepción de los robots como su propia morfología. Entre estos robots dedicados a aplicaciones no industriales destacan los robots especiales (brazos para lanzamiento y recuperación de satélites, vehículos de exploración lunar, robots para construcción y mantenimiento de hardware en el espacio); robots para aplicaciones submarinas y subterráneas (exploración submarina, instalación y mantenimiento de cables telefónicos submarinos, limpieza e inspección de tuberías y drenajes subterráneos, inspección de sistemas de refrigeración de centrales nucleares); robots militares (desactivación de bombas, robots centinelas experimentales dedicados a patrullar áreas críticas); robots móviles industriales (robots bomberos para patrullar fábricas, robots bibliotecarios, robots andantes con piernas); aplicaciones médicas (prótesis robotizadas, sistemas de ayuda a discapacitados); aplicaciones agrícolas (sembrado y recogida de cosechas, robot para esquilarse ovejas); etc. Parece como si la robótica y los telemanipuladores estuvieran observando sus orígenes con una experiencia acumulada de 30 años cuyos caminos divergentes esta vez se unieran.

2.2 Morfología del robot

Un robot está formado por los siguientes elementos: estructura mecánica, transmisiones, sistema de accionamiento, sistema sensorial, sistema de control y elementos terminales.

2.2.1 Estructura mecánica de un robot

Mecánicamente, un robot está formado por una serie de elementos o eslabones unidos mediante articulaciones que permiten un movimiento relativo entre cada dos eslabones consecutivos. La constitución física de la mayor parte de los robots industriales guarda cierta similitud con la anatomía del brazo humano, por lo que en ocasiones, para hacer referencia a los distintos elementos que componen el robot, se usan términos como cuerpo, brazo, codo y muñeca.

El movimiento de cada articulación puede ser de desplazamiento, de giro o una combinación de ambos. De este modo son posibles los seis tipos diferentes de articulaciones que se muestran en la Figura 2.1, aunque, en la práctica, es más empleada la de rotación y la prismática (Barrientos et al., 2007).

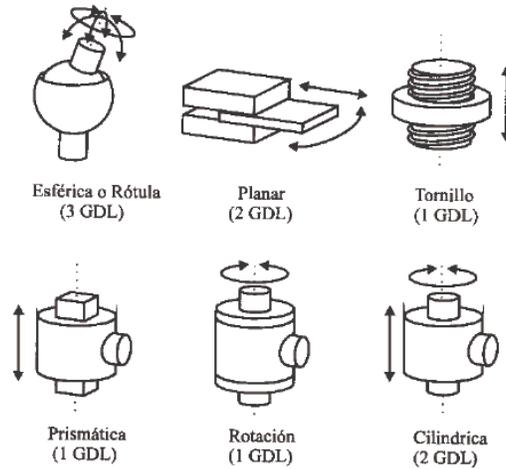


Figura 2.1 Distintos tipos de articulaciones para robots

Cada uno de los movimientos independientes que puede realizar cada articulación con respecto a la anterior, se denomina *grado de libertad* (GDL). En la Figura 2.1 se indica el número de grados de libertad para cada tipo de articulación. El número de grados de libertad del robot viene dado por la suma de los grados de libertad de las articulaciones que lo componen. Puesto que, como se ha indicado, las articulaciones empleadas son únicamente las de rotación y prismática con un solo grado de libertad cada una, el número de GDL del robot suele coincidir con el número de articulaciones de que se compone. El empleo de las diferentes combinaciones de articulaciones en un robot, da lugar a diferentes configuraciones, con características a tener en cuenta tanto el diseño y construcción del robot como en su aplicación. Las combinaciones más frecuentes son las representadas en la Figura 2.2 donde se atiende únicamente a las tres primeras articulaciones del robot, que son las más importantes a la hora de posicionar su extremo en un punto del espacio (Barrientos et al., 2007).

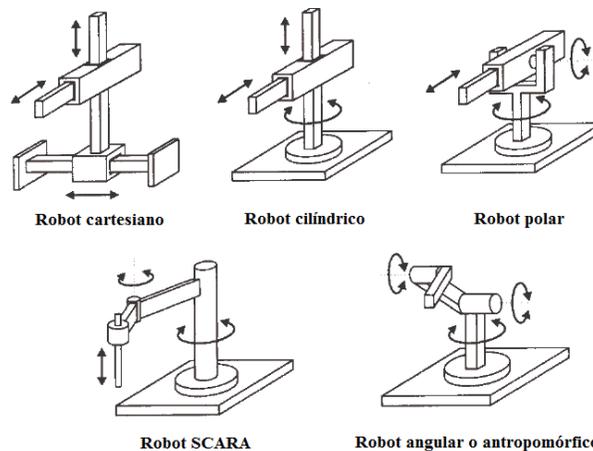


Figura 2.2 Configuraciones más frecuentes en robots industriales.

Puesto que para posicionar y orientar un cuerpo de cualquier manera en el espacio son necesarios seis parámetros, tres para definir la posición y tres para la orientación, si se pretende que un robot posicione y oriente su extremo (y con él la pieza o herramienta manipulada) de cualquier modo en el espacio se precisarán al menos seis GDL.

En la Figura 2.3 se muestran los seis grados de libertad con que está dotado el robot ARC Mate 120iC/10C de Fanuc, así como sus articulaciones y eslabones.

En la práctica, a pesar de ser necesarios los seis GDL comentados para tener total libertad en el posicionado y orientación del extremo del robot, muchos robots industriales cuentan con solo cuatro o cinco GDL, por ser estos suficientes para llevar a cabo las tareas que se les encomiendan.

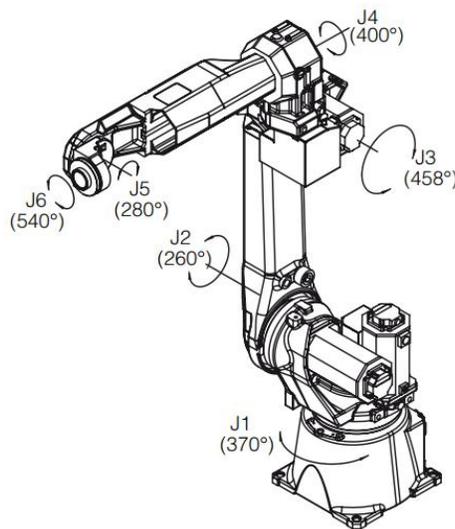


Figura 2.3 Grados de libertad del robot ARC Mate 120iC/10C de Fanuc.

2.3 Transmisiones y reductores

Las transmisiones son los elementos encargados de transmitir el movimiento desde los actuadores hasta las articulaciones. Los reductores, son encargados de adaptar el par y la velocidad de salida del actuador a los valores adecuados para el movimiento de los elementos del robot.

2.3.1 Transmisiones

Dado que un robot mueve su extremo con aceleraciones elevadas, es de gran importancia reducir al máximo su momento de inercia. Del mismo modo, los pares estáticos que deben vencer los actuadores dependen directamente de la distancia de las masas al actuador. Por estos motivos se procura que los actuadores, por lo general pesados, estén lo más cerca posible de la base del robot. Esta circunstancia obliga a utilizar sistemas de transmisión que trasladen el movimiento hasta las articulaciones especialmente a las situadas en el extremo del robot.

Tabla 1. Sistemas de transmisión para robots

Entrada-Salida	Denominación	Ventajas	Inconvenientes
Circular - Circular	Engranaje	Pares altos	Holguras
	Correa dentada	Distancia grande	
	Cadena	Distancia grande	Ruido
	Paralelogramo		Giro limitado
	Cable		Deformabilidad
Circular - Lineal	Tornillo sin fin	Poca Holgura	Rozamiento
	Cremallera	Holgura media	Rozamiento
Lineal - Circular	Par articulado		Control difícil
	Cremallera	Holgura media	Rozamiento

Aunque no existe un único sistema de transmisión para los robots, si se mencionan los usados con mayor frecuencia en la Tabla 1, dicha clasificación se establece con base al tipo de movimiento posible en la entrada y la salida: lineal o circular, también se hace mención de algunas ventajas e inconvenientes propios de algunos sistemas de transmisión, también se debe tener en cuenta que el sistema de transmisión sea capaz de soportar un funcionamiento dinámico continuo a un par elevado, y de ser posible entre grandes distancias (Barrientos et al., 2007).

2.3.2 Reductores

Los reductores son sistemas mecánicos usados preferentemente en robots industriales, esto es debido a que los reductores empleados en la robótica deben de cumplir condiciones de funcionamiento muy estrictas. La implementación de estas características es debido a que se mejora en el robot su precisión y la velocidad de posicionamiento. La Tabla 2 los valores que se aplican en los reductores para la robótica actualmente.

Tabla 2. Características de reductores para robótica

Características de los reductores para robótica	
Características	Valores típicos
Relación de reducción	50 / 300
Peso y tamaño	0.1 / 30 kg
Momento de inercia	0.0001 kg m ²
Velocidades de entrada máxima	6000 / 7000 rpm
Par de salida nominal	5700 N m
Par de salida máximo	7900 N m
Juego angular	0-2"
Rigidez torsional	100 / 2000 N m/rad
Rendimiento	85% / 98%

Los reductores, por motivos de diseño, tienen una velocidad máxima tolerable, que como regla general se incrementa a medida que disminuye el tamaño del motor. También existe una limitación en cuanto al par de entrada nominal aceptable (T_2) que depende del par de entrada (T_1) y de la relación de transmisión a través de la relación:

$$T_2 = \eta T_1 \frac{\omega_1}{\omega_2} \quad 1)$$

Donde el rendimiento, η , puede aproximarse al 100%, y la relación de reducción de velocidades (ω_1 = velocidad de entrada; ω_2 = velocidad de salida) varía entre el rango de 50 y 300 (Barrientos et al., 2007).

2.3.3 Accionamiento directo

Existen robots que poseen lo que ahora se le denomina accionamiento directo (Direct Drive DD), en el que el eje del actuador se conecta directamente a la carga o articulación, sin el empleo de un reductor intermedio (Youcef-Toumi, 1989). Este término suele emplearse exclusivamente para robots con accionamiento eléctrico.

Este tipo de accionamiento surge de la necesidad de utilizar robots en aplicaciones que exigen combinar mayor precisión con alta velocidad. Los reductores infligen efectos negativos, como son el juego angular, rozamiento o disminución de la rigidez del accionador, que impiden obtener los valores de precisión y velocidad requeridos.

Las principales ventajas de utilizar accionamientos directos son las siguientes:

- Posicionamiento rápido y preciso, ya que se evitan los rozamientos y juegos de las transmisiones y reductores.
- Mayor controlabilidad del sistema a costa de una mayor complejidad.
- Simplificación del sistema mecánico al eliminarse el reductor.

La problemática que existe para la aplicación práctica de un accionamiento directo radica en el motor a emplear. Debe de tratarse de motores que proporcionen un par elevado (unas 50-100 veces mayor que con reductor) a bajas revoluciones (las de movimiento de articulación) manteniendo la máxima rigidez posible.

2.4 Actuadores

Los actuadores tienen como propósito generar el movimiento de los elementos del robot por las órdenes dadas por la unidad de control. Los actuadores más comunes en la robótica son del tipo neumático, hidráulico y eléctrico. Cada uno de estos sistemas presenta características diferentes, esto dependiendo el uso que se le quiera dar para seleccionar el tipo de actuador más conveniente. Las características más comunes a considerar son:

- Potencia
- Controlabilidad
- Peso y volumen
- Precisión
- Velocidad
- Mantenimiento
- Costo

2.4.1 Actuadores neumáticos

La fuente de energía de un actuador neumático es el aire a presión el cual ronda en un rango de entre 5 y 10 bar. Existen dos tipos de actuadores neumáticos:

- Cilindros neumáticos
- Motores neumáticos (de aletas rotativas o de pistones axiales)

2.4.2 Actuadores hidráulicos

Este tipo de actuadores no es muy diferente funcionalmente respecto a los neumáticos, ya que en éstos el lugar de aire se utiliza aceite mineral a una presión comprendida normalmente entre los 50 y 100 bar, llegándose a superar en ocasiones los 300 bar. Existen como en el caso de los neumáticos, actuadores de tipo cilíndrico y del tipo motores de aletas y pistones.

Los actuadores hidráulicos se utilizan con frecuencia en robots que deben manejar grandes cargas (Barrientos et al., 2007).

2.4.3 Actuadores eléctricos

Son los más usados en los robots industriales actuales esto debido a que son fáciles de controlar, sencillos y precisos. Hay tres tipos de actuadores eléctricos: motores de corriente continua (controlados por inducción, controlados por excitación), motores de corriente alterna (síncronos, asíncronos) y motores pasó a paso.

Los motores de corriente continua son los más empleados en la actualidad debido a su facilidad de control. Como un breve resumen de los tipos de actuadores utilizados en robótica, en la Tabla 3 se presenta un cuadro comparativo de estos.

Tabla 3. Características de los distintos tipos de actuadores para robots.

	Neumático	Hidráulico	Eléctrico
Energía	Aire a presión (5-10 bar)	Aceite mineral (50-100 bar)	Corriente eléctrica
Opciones	<ul style="list-style-type: none"> • Cilindros • Motor de paletas • Motor de pistón 	<ul style="list-style-type: none"> • Cilindros • Motor de paletas • Motor de pistones axiales 	<ul style="list-style-type: none"> • Corriente • Corriente alterna • Motor paso a paso
Ventajas	<ul style="list-style-type: none"> • Baratos • Rápidos • Sencillos • Robustos 	<ul style="list-style-type: none"> • Rápidos • Alta relación potencia- • Autolubricantes • Alta capacidad de carga • Estabilidad frente a cargas estáticas 	<ul style="list-style-type: none"> • Precisos • Fiables • Fácil control • Sencilla • Silenciosos
Desventajas	<ul style="list-style-type: none"> • Dificultad de control continuo • Instalación especial (compresor, filtros) • Ruidoso 	<ul style="list-style-type: none"> • Difícil mantenimiento • Instalación especial (filtros, eliminación aire) • Frecuentes fugas • Caros 	<ul style="list-style-type: none"> • Potencia limitada

2.5 Sensores empleados en la robótica

Las variables básicas o más comunes a medir en un robot manipulador son posición, velocidad, aceleración, fuerza, y contacto o presión. La Tabla 4 lista algunas de las variables físicas de interés en robótica, y los tipos de sensores utilizados para medir estas variables físicas.

Tabla 4. Principales variables físicas en la robótica.

Variable física	Tipo de sensor
Posición	Potenciómetro Codificador óptico absoluto y lineal Efecto Hall LVDT
Velocidad	Codificador óptico incremental Tacogenerador
Fuerza	Sensor de fuerza y torque de múltiples ejes
Aceleración	Acelerómetro

2.6 Cinemática del robot manipulador

La cinemática del robot manipulador estudia el movimiento del mismo con respecto a un sistema de referencia. Así, la cinemática se enfoca por la descripción analítica del movimiento espacial del robot como una función del tiempo, y particularmente por las relaciones entre la posición y la orientación del extremo final del robot con los valores que adquieren sus coordenadas articulares. Existen dos modelos fundamentales a resolver en la cinemática del robot (Figura 2.4); el primero de ellos se conoce como el modelo cinemático directo, y consiste en determinar cuál es la posición y orientación del extremo final del robot, con respecto a un sistema de coordenadas que se toma como referencia, considerando los valores de las articulaciones y los parámetros geométricos de los elementos del robot; el segundo, denominado modelo cinemático inverso, resuelve la configuración que debe adoptar el robot para una posición y orientación del extremo conocidas (Barrientos, 2007).

En 1955 Denavit y Hartenberg propusieron un método para describir y representar la geometría espacial de los elementos de una cadena cinemática, particularmente de un robot, con respecto a un sistema de referencia fijo. Este método utiliza una matriz de transformación homogénea para describir la relación espacial entre dos elementos rígidos adyacentes, reduciéndose el modelo cinemático directo a encontrar una matriz de transformación homogénea 4x4 que relacione la localización espacial del extremo del robot con respecto al sistema de coordenadas de su base.

Por otra parte, la cinemática del robot manipulador trata también de encontrar las relaciones entre las velocidades del movimiento de las articulaciones y las del extremo. Esta relación es descrita por el modelo diferencial expresado mediante la matriz Jacobiana.

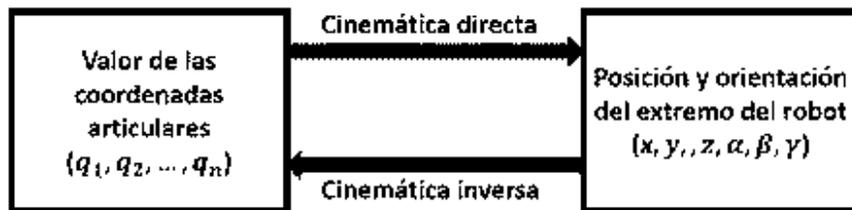


Figura 2.4 Diagrama de relación entre la cinemática directa e inversa

Debido a que un robot se considera como una cadena cinemática formada por objetos rígidos o eslabones unidos entre sí mediante articulaciones, se establece un sistema de referencia fijo situado en la base del robot y se describe la localización de cada uno de los eslabones con respecto al sistema de referencia. De esta manera, el modelo cinemático directo se reduce a encontrar una matriz homogénea de transformación T que relacione la posición y orientación del extremo del robot con respecto al sistema de referencia fijo situado en la base del mismo, la matriz T estará en función de las coordenadas articulares (Barrientos et al., 2007).

2.6.1 Modelo cinemático directo

La solución al modelo cinemático directo consiste en encontrar las relaciones que permiten conocer la localización espacial del extremo del robot a partir de los valores de sus coordenadas articulares. Por ejemplo, si se escogen coordenadas cartesianas y ángulos de Euler para representar la posición y orientación del extremo de un robot de seis grados de libertad, la solución del modelo cinemático directo vendrá dada por las relaciones:

$$x = f_x(q_1, q_2, q_3, q_4, q_5, q_6) \quad 2)$$

$$y = f_y(q_1, q_2, q_3, q_4, q_5, q_6)$$

$$z = f_z(q_1, q_2, q_3, q_4, q_5, q_6)$$

$$\alpha = f_\alpha(q_1, q_2, q_3, q_4, q_5, q_6)$$

$$\beta = f_\beta(q_1, q_2, q_3, q_4, q_5, q_6)$$

$$\gamma = f_\gamma(q_1, q_2, q_3, q_4, q_5, q_6)$$

En general, un robot de n grados de libertad está formado por n eslabones unidos por n articulaciones, de forma que cada par articulación-eslabón constituye un grado de libertad. A cada eslabón se le puede asociar un sistema de referencia solidario a él y, utilizando las transformaciones homogéneas, es posible representar las rotaciones y traslaciones relativas entre los distintos eslabones que componen el robot.

Normalmente, la matriz de transformación homogénea que representa la posición y orientación relativa entre los sistemas asociados a dos eslabones consecutivos del robot se suele denominar matriz ${}^{i-1}_iA$. Así pues, 0_1A describe la posición y orientación del sistema de referencia solidario al primer eslabón con respecto al sistema de referencia solidario a la base, 1_2A describe la posición y orientación del segundo eslabón respecto del primero, etc. Del mismo modo, denominando 0_kA a las matrices resultantes del producto de las matrices ${}^{i-1}_iA$ con i desde 1 hasta k , se puede representar de forma total o parcial la cadena cinemática que forma el robot. Así, por ejemplo, la posición y orientación del sistema solidario con el segundo eslabón del robot con respecto al sistema de coordenadas de la base se puede expresar mediante la matriz 0_2A , (ver Figura 2.5).

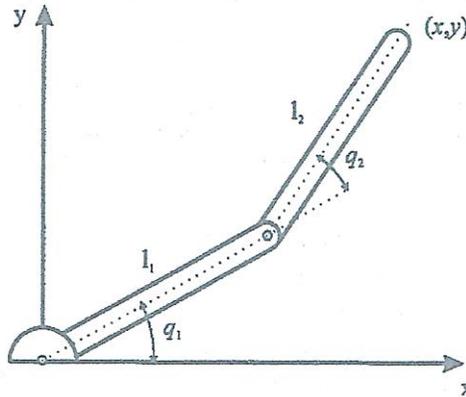


Figura 2.5 Robot planar de dos grados de libertad.

$${}^0_2A = {}^0_1A {}^1_2A \quad 3)$$

De manera análoga, la matriz 0_3A representa la localización del sistema del tercer eslabón:

$${}^0_3A = {}^0_1A {}^1_2A {}^2_3A \quad 4)$$

Cuando se consideran todos los grados de libertad, a la matriz 0_nA se le suele denominar T . Así, dado un robot de seis grados de libertad, se tiene que la posición y orientación del eslabón final vendrá dada por la matriz T :

$$T = {}^0_6A = {}^0_1A {}^1_2A {}^2_3A {}^3_4A {}^4_5A {}^5_6A \quad 5)$$

Aunque para describir la relación que existe entre dos elementos contiguos se puede hacer uso de cualquier sistema de referencia ligado a cada elemento, la forma habitual que se suele utilizar en robótica es la representación de Denavit-Hartenberg (D-H). Denavit y Hartenberg propusieron en 1955 un método matricial que permite establecer de manera sistemática un sistema de coordenadas $\{S_i\}$ ligado a cada eslabón i de una cadena articulada, pudiéndose determinar a continuación las ecuaciones cinemáticas de la cadena completa.

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

1. Rotación alrededor del eje z_{i-1} un ángulo θ_i .
2. Traslación a lo largo de z_{i-1} una distancia d_i ; vector $d_i(0,0, d_i)$.
3. Traslación a lo largo de x_i una distancia a_i ; vector $a_i(0, 0, a_i)$.
4. Rotación alrededor del eje x_i un ángulo α_i .

Dado que el producto de matrices no es conmutativo, las transformaciones se han de realizar en el orden indicado. De este modo se tiene que:

$${}^{i-1}A_i = T(z, \theta_i)T(0, 0, d_i)T(a_i, 0, 0)T(x, \alpha_i) \quad 6)$$

y realizando el producto entre matrices:

$$A_{i-1}^i(\theta_i, d_i, \alpha_i, a_i) = \begin{vmatrix} C\theta_i & -C\alpha_i S\theta_i & S\alpha_i S\theta_i & a_i C\theta_i \\ S\theta_i & C\alpha_i C\theta_i & -S\alpha_i C\theta_i & a_i S\theta_i \\ 0 & S\alpha_i & C\alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} \quad 7)$$

donde $\theta_i, d_i, \alpha_i, a_i$ son los parámetros D-H del eslabón i . De este modo, basta con identificar los parámetros $\theta_i, d_i, \alpha_i, a_i$, para obtener las matrices A y relacionar así todos y cada uno los eslabones del robot (Chacón et. al., 2015).

Como se ha indicado, para que la matriz ${}^{i-1}A_i$, (la cual se muestra en la ecuación 7) relacione los sistemas $\{S_{i-1}\}$ y $\{S_i\}$, es necesario que los sistemas se hayan escogido de acuerdo a unas determinadas normas. Éstas, junto con la definición de los 4 parámetros de Denavit Hartenberg, conforman el algoritmo para la resolución del modelo cinemático directo el cual se menciona en el anexo A1.

Los cuatro parámetros de D-H ($\theta_i, d_i, \alpha_i, a_i$) dependen únicamente de las características geométricas de cada eslabón y de las articulaciones que le unen con el anterior y siguiente. En concreto estos representan (ver Figura 2.6):

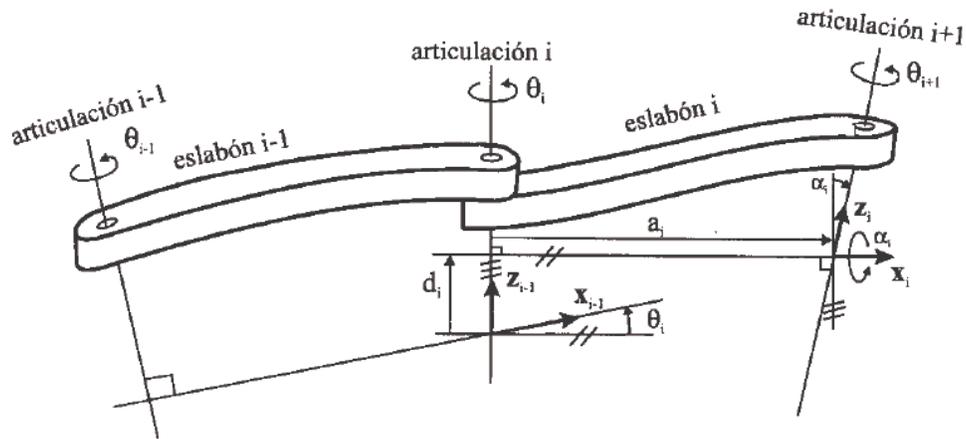


Figura 2.6 Parámetros D-H para un eslabón giratorio.

θ_i Es el ángulo que forman los ejes x_i y x_{i-1} medido en un plano perpendicular al eje z_{i-1} , utilizando la regla de la mano derecha. Se trata de un parámetro variable en articulaciones giratorias.

d_i Es la distancia a lo largo del eje z_{i-1} desde el origen del sistema de coordenadas (i-1)-ésimo hasta la intersección del eje z_{i-1} con el eje x_i . Se trata de un parámetro variable en articulaciones prismáticas.

a_i Es la distancia a lo largo del eje x_i que va desde la intersección del eje z_{i-1} con el eje x_i hasta el origen del sistema i -ésimo, en el caso de articulaciones giratorias. En el caso de articulaciones prismáticas, se calcula como la distancia más corta entre los ejes z_{i-1} y z_i .

α_i Es el ángulo de separación del eje z_{i-1} y el eje z_i , medido en un plano perpendicular al eje x_i , utilizando la regla de la mano derecha.

Una vez obtenidos los parámetros D-H, el cálculo de las relaciones entre los eslabones consecutivos del robot es inmediato, ya que vienen dadas por las matrices A , que se calculan según la ecuación 7). Las relaciones entre eslabones no consecutivos vienen dadas por las matrices T que, como ya se comentó anteriormente, se obtienen como producto de un conjunto de matrices A (Denavit, 1955).

Por ejemplo se desea obtener el modelo cinemático directo para un robot cilíndrico mostrado en la Figura 2.7 (Barrientos et al., 2007).

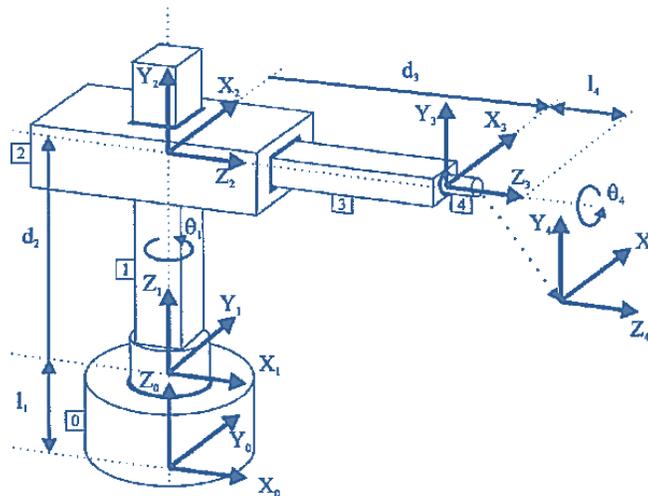


Figura 2.7 Robot cilíndrico.

Como primer punto, se localizan los sistemas de referencia de cada una de las articulaciones del robot (ver figura 2.7). Posteriormente se aplica el algoritmo de Denavit-Hartenberg al robot para obtener los parámetros los cuales se muestran en la tabla 5.

Tabla 5. Parámetros D-H para el robot cilíndrico

Articulación	θ	d	α	a
1	θ_1	l_1	0	0
2	90	d_2	90	0
3	0	d_3	0	0
4	θ_4	l_4	0	0

Una vez calculados los parámetros de cada eslabón, a matriz de transformación homogénea resultante (ver ecuación 8), la cual indica la localización del sistema final con respecto al sistema de referencia de la base del robot.

$$T = {}^0A_1{}^1A_2{}^2A_3{}^3A_4{}^4A_5A = \begin{bmatrix} -S_1C_4 & S_1S_4 & C_1 & C_1(d_3 + l_4) \\ C_1C_4 & -C_1S_4 & S_1 & S_1(d_3 + l_4) \\ S_4 & S\alpha_i & 0 & d_2 + l_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad 8)$$

2.6.2 Modelo cinemático inverso

El modelo cinemático inverso radica en encontrar los valores que han de adoptar las coordenadas articulares del robot $q = [q_1, q_2, \dots, q_n]^T$ para que su extremo se posicione y oriente según una determinada localización espacial.

Así cómo es posible abordar el modelo cinemático directo de una manera sistemática a partir del uso de matrices de transformación homogéneas, e independientemente de la configuración del robot, no ocurre lo mismo con el modelo cinemático inverso, siendo el procedimiento de obtención de las ecuaciones fuertemente dependiente de la configuración del robot.

Se han desarrollado algunos procedimientos genéricos susceptibles de ser programados para que un computador pueda, a partir del conocimiento de la cinemática del robot (con sus parámetros de Denavit-Hartenberg, por ejemplo) obtener la n-upla de valores articulares que posicionan y orientan su extremo (Craig, 2006).

El inconveniente de estos procedimientos es que se trata de métodos numéricos iterativos, cuya velocidad de convergencia e incluso su convergencia en sí no está siempre garantizada.

El modelo cinemático inverso ofrece las siguientes ventajas:

1. En muchas aplicaciones, el modelo cinemático inverso ha de resolverse en tiempo real (por ejemplo, en el seguimiento de una determinada trayectoria). Una solución de tipo iterativo no garantiza tener la solución en el momento adecuado,

2. Al contrario de lo que ocurría en el modelo cinemático directo, con cierta frecuencia la solución del problema cinemático inverso no es única; existiendo diferentes n-uplas $[q_1, q_2, \dots, q_n]^T$ que posicionan y orientan el extremo del robot del mismo modo. En estos casos una solución cerrada permite incluir determinadas reglas o restricciones que aseguren que la solución obtenida sea la más adecuada de entre las posibles (por ejemplo, límites en los recorridos articulares).

Los métodos geométricos aplicados al modelo cinemático inverso permiten obtener los valores de las primeras variables articulares, que son las que consiguen posicionar el robot (prescindiendo de la orientación del extremo).

Para el método geométrico se utilizan relaciones trigonométricas y geométricas sobre los elementos del robot, donde se suele recurrir a la solución mediante los triángulos formados por los elementos y articulaciones del robot.

2.7 Anatomía del brazo humano y sus movimientos

El esqueleto del miembro superior (brazo humano, ver Figura 2.8) está compuesto por la cintura escapular y por el brazo. La cintura escapular (clavícula y escápula) une esta extremidad con el tronco: el miembro con el tórax mediante la articulación esternoclavicular y el brazo con el hombro mediante la articulación glenohumeral (Schünke, Schulte, Schumacher. 2015).

En la porción libre del miembro superior distinguimos entre:

- Brazo
- Antebrazo
- Mano.

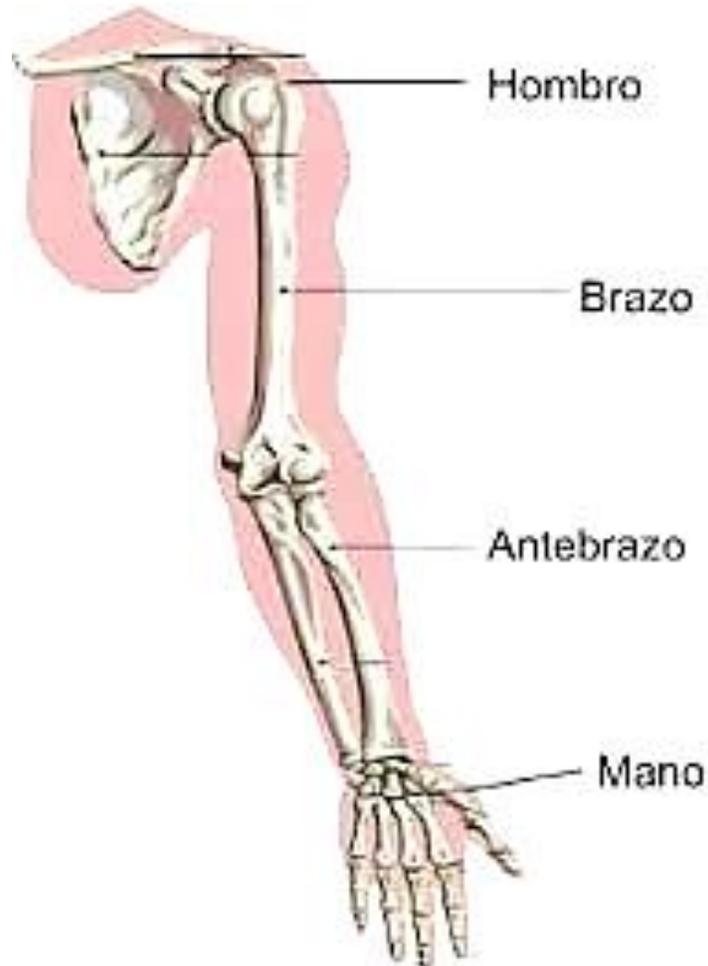


Figura 2.8 Partes que conforman el miembro superior (brazo humano).

2.7.1 Movimientos del brazo humano

2.7.1.1 Movimientos en la cintura escapular y en la articulación del hombro

A. Movimientos en la articulación del hombro

Como típica articulación esferoide, la articulación del hombro gira alrededor de tres ejes principales perpendiculares entre ellos. Los tres grados de libertad hacen posible generar 6 direcciones principales de movimiento. De forma muy general, podemos dividir los movimientos del hombro en movimientos verticales, horizontales y de rotación. En los movimientos verticales se eleva el brazo que estaba colgando desde la posición neutra en diferentes direcciones. Los movimientos horizontales conducen el brazo abducido a 90° hacia delante o hacia atrás. Los movimientos de rotación son posibles en todas las posiciones del brazo. (Schünke et. al. 2015).

- a) Los movimientos de anteversión y/o retroversión (flexión o extensión) se efectúan alrededor de un eje horizontal (ver Figura 2.9a).
- b) La anteversión y la retroversión de un brazo abducido a 90° : también se consideran movimientos horizontales (ver Figura 2.9 b).
- c) Los movimientos de abducción y de aducción se efectúan alrededor de un eje sagital, aunque los movimientos a partir de 90° se designan frecuentemente como movimientos de elevación. En la práctica clínica se acostumbra a utilizar el término elevación para todos los movimientos verticales. A partir de 80° - 90° de abducción se realiza automáticamente un movimiento de rotación externa, con el que se evita una compresión del tubérculo mayor contra el techo del hombro. Si, en cambio, se abduce el brazo en posición de rotación interna, solamente son posibles unos 60° de abducción (ver Figura 2.9c).
- d) Los movimientos de rotación interna y externa se efectúan alrededor del eje longitudinal (eje diafisario) del húmero. Con el codo flexionado, el antebrazo nos puede servir de aguja indicadora. Si el brazo está colgando, la rotación interna máxima está impedida por el tronco. La posición del brazo detrás del tronco se corresponde con una rotación interna de 95° (e). Con el brazo abducido a 90° aumenta la amplitud de la rotación externa pero disminuye la rotación interna máxima (f), (ver Figura 2.9 d-f).

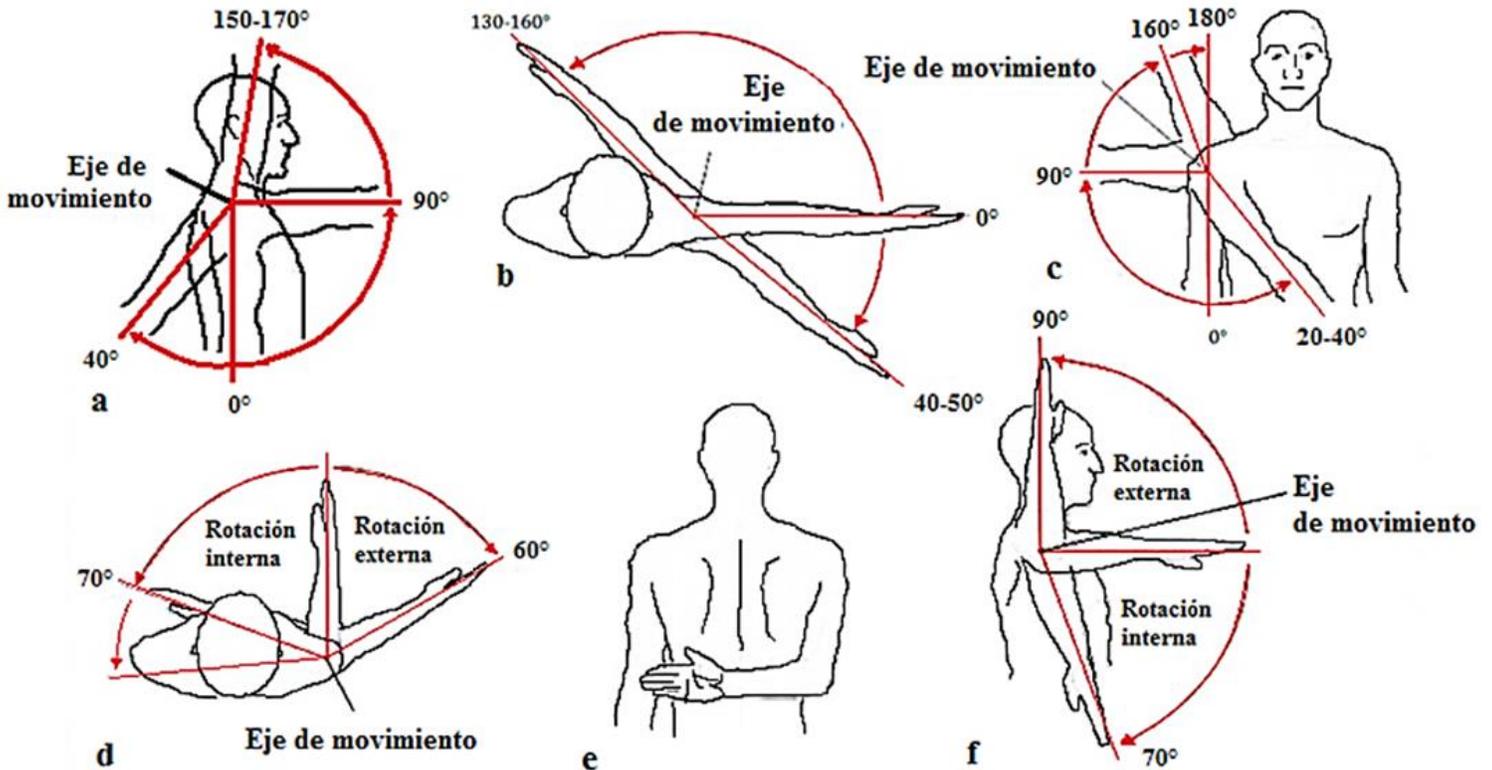


Figura 2.9 Movimientos en la articulación del hombro.

B. Ritmo escapulohumeral

Al efectuar la abducción, el brazo y la escápula se mueven con una relación de 2:1, o sea, en una abducción de 90°, 60° se realizan en la articulación escapulohumeral y 30° mediante el movimiento simultáneo de la cintura escapular. Este "ritmo escapulohumeral" entra en juego solamente cuando la escápula participa del movimiento de abducción. En las patologías del hombro este ritmo se ve afectado, el movimiento de balanceo de la escápula acostumbra al aparecer mucho antes. Muy impresionantes son los movimientos de la porción libre del miembro superior cuando la articulación del hombro padece de rigidez (por ejemplo el estado de la articulación después de haber hecho una artrodesis de la articulación glenohumeral). En estos casos, el brazo puede efectuar una abducción de unos 40°-60° solamente gracias a los movimientos de la cintura escapular, y también es posible efectuar un tercio de la anteversión y retroversión normales (Schünke et. al. 2015) (ver Figura 2.10).

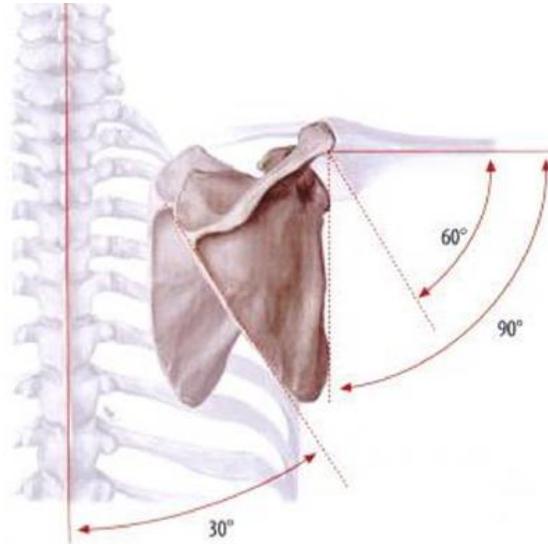


Figura 2.10 Ritmo escapulo-humeral.

2.7.1.2 Movimientos en la articulación del codo

A. Amplitud de movimiento de las articulaciones humerorradial y humerocubital de la articulación del codo

El eje de flexión y extensión discurre por debajo de los epicóndilos, atravesando la cabeza humeral y la tróclea del húmero. Partiendo de la posición neutra, en ambas articulaciones es posible efectuar una flexión de máximo 150° y una extensión de unos 10° . Ambos movimientos se ven limitados de diferente forma bien por las partes blandas (musculatura, grasa, etc. = inhibición por partes blandas), bien por los huesos (olécranon = inhibición ósea), (ver Figura 2.11).

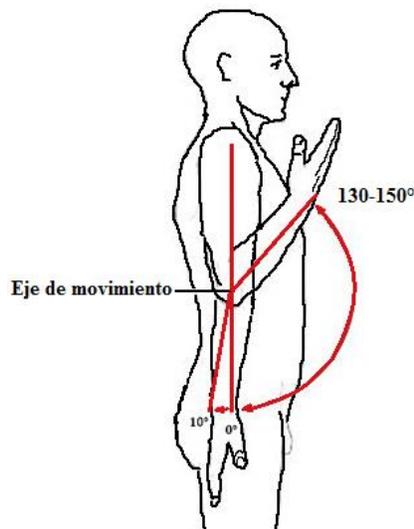


Figura 2.11 Amplitud de movimiento de las articulaciones humerorradial y humerocubital de la articulación del codo.

2.7.1.3 Movimientos en las articulaciones de la mano y de los dedos

A. Movimientos y ejes de movimiento de las articulaciones proximal y distal de la muñeca.

Partiendo de la posición neutra se efectúan los movimientos de flexión (palmar) y extensión (dorsal) en un eje transversal (a. El eje transversal pasa por la articulación proximal de la muñeca a través del hueso semilunar, y por la articulación distal a través del hueso grande. El eje dorso-palmar pasa por el hueso grande. Así podemos ver que la flexión y la extensión son posibles tanto en la articulación proximal como en la distal (ver Figura 2.12).

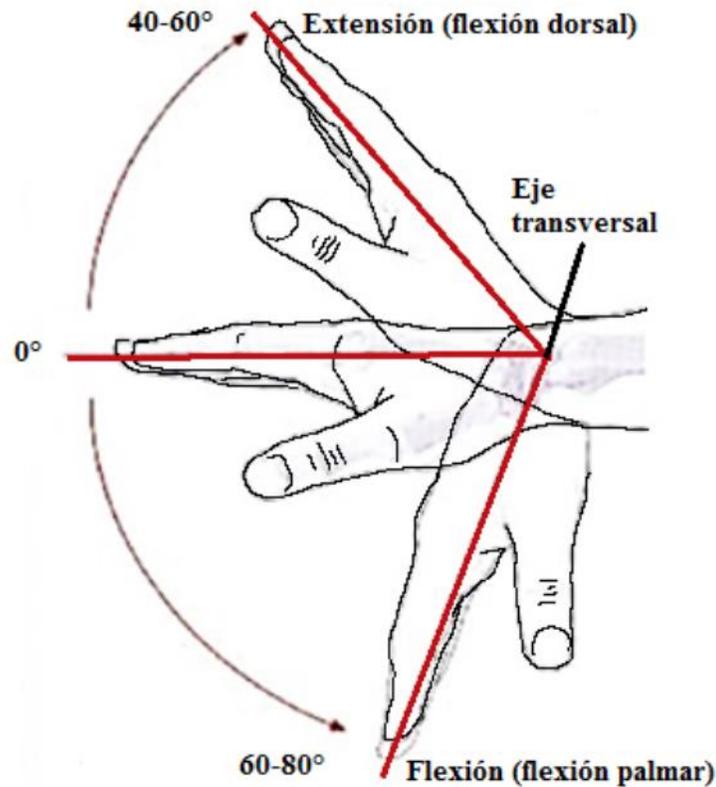


Figura 2.12 Movimiento y ejes de movimiento de las articulaciones proximal y distal de la muñeca.

B. Amplitud de movimiento de las articulaciones de los dedos

Las articulaciones interfalángicas proximales y distales (IFP e IFD) son articulaciones de charnela puras con un solo grado de libertad (flexión y extensión). Las articulaciones metacarpofalángicas (MCF) del 2° al 5° dedo son articulaciones morfológicamente esferoideas que, en principio, tienen tres grados de libertad, pero el tercer grado de libertad, la rotación, está limitada por los ligamentos, colaterales, de forma que finalmente solamente quedan dos grados de libertad: flexión, extensión y abducción-aducción.

Individualmente, en las articulaciones de los dedos podemos diferenciar los siguientes movimientos articulares (Schünke et. al. 2015):

- a) Flexión en la Art. interfalángica distal (IFD);
- b) Flexión en la Art. interfalángica proximal (IFP);
- c) Flexión en la Art. metacarpofalángica (MCF);
- d) Extensión en la Art. interfalángica distal (IFD);
- e) Extensión en la Art. metacarpofalángica (MCF);
- f) Abducción y aducción en las Arts. metacarpofalángicas (movimiento de separar y juntar los dedos en un eje dorso-palmar que pasa por las cabezas de los metacarpianos).

La denominación de los movimientos parte del dedo medio: todos los movimientos que se apartan del dedo medio se designan como abducción, y los que se acercan a él como aducción (ver Figura 2.13).

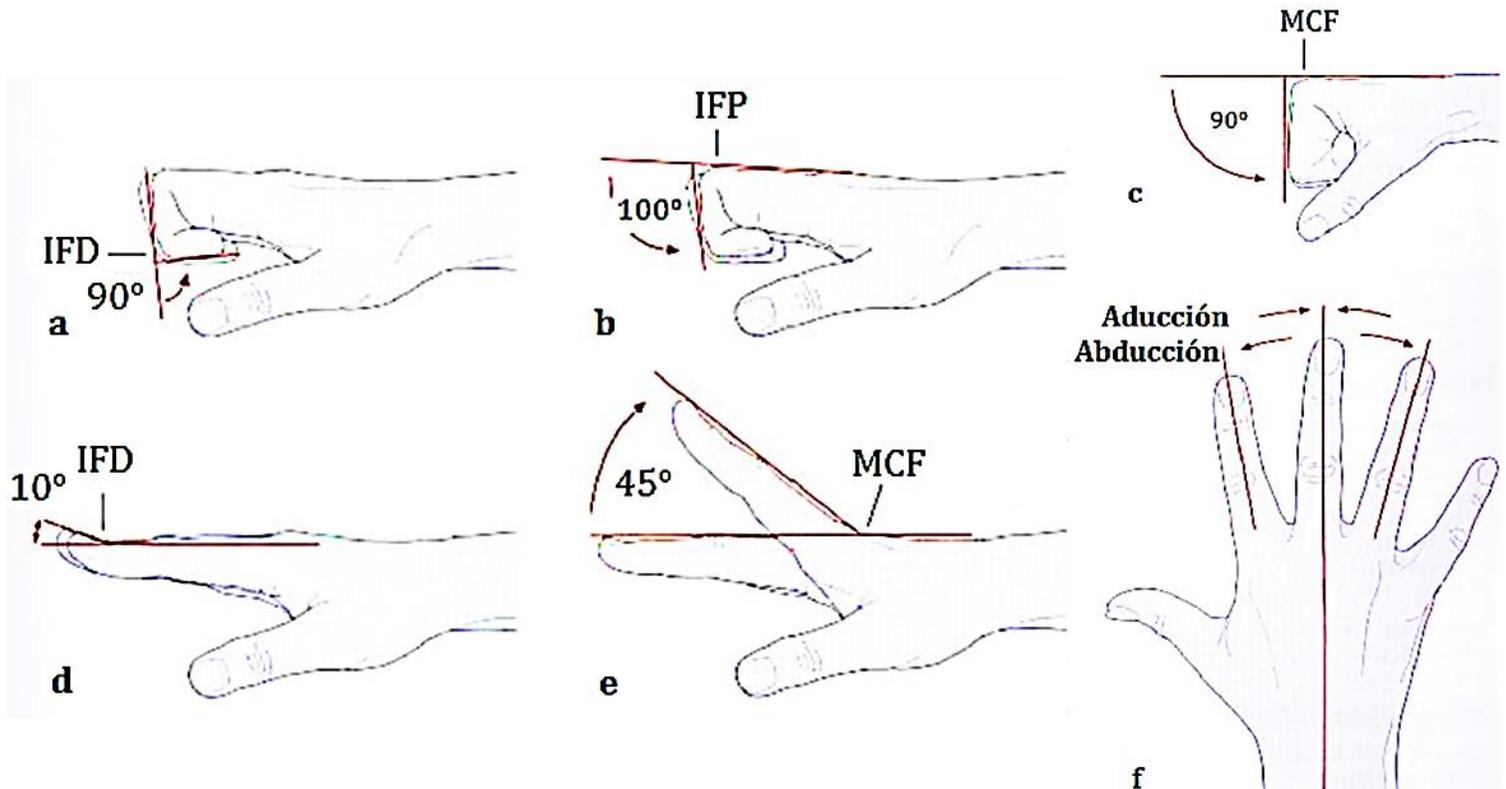


Figura 2.13 Amplitud de movimiento de las articulaciones de los dedos.

2.8 Teleoperación

La teleoperación es imprescindible en un gran número de las aplicaciones de la robótica, especialmente en entornos no estructurados y dinámicos en los cuales los problemas de percepción y planificación automática son muy complejos. En muchos casos, el operador está físicamente separado del robot, existiendo un sistema de telecomunicaciones entre los dispositivos que utiliza directamente el operador y el sistema de control local del robot (Ollero, 2001).

La intervención del operador puede producirse en muchas formas diferentes, desde la teleoperación directa de los actuadores de las articulaciones, hasta la simple especificación de movimientos, o incluso de tareas, que se realizan de forma automática.

Se entiende por teleoperación la extensión de capacidades sensoriales y destreza humanas a una localización remota. Se utilizan los términos de *teleactuación* para referirse a los aspectos específicos de generación de órdenes a los actuadores y de telesensorización para la captación y visualización de información sensorial.

La telerobótica puede considerarse como una forma evolucionada de teleoperación, caracterizada por un aumento de autonomía (capacidad de decisión y actuación) en el sistema remoto manteniendo una intervención significativa del operador humano para supervisión o teleoperación directa. En telerobótica la comunicación entre el operador humano y el computador de control se realiza a un nivel más elevado que en la teleoperación convencional (Vertut y Coiffet, 1985; Sheridan, 1989).

Por lo que respecta a las funciones específicas de control, en telerobótica se emplean los términos de control supervisado (“supervisory”), compartido (“shared”) e intercambiado o negociado (“traded”). En control supervisado el hombre dirige y monitoriza las actividades de un sistema semiautónomo de control. El control compartido consiste en una combinación de autonomía y telecontrol para controlar una función dada. El control intercambiado es una selección de autonomía o telecontrol para controlar una determinada función. El término control de supervisión tiene un sentido más amplio incluyendo métodos de simulación, planificación y ayuda a la toma de decisiones del operador empleando sistemas informáticos.

Otro concepto específico de la teleoperación de manipuladores es el de sistemas bilaterales, compuestos por un manipulador maestro y un manipulador esclavo que debe reproducir los movimientos que se generan moviendo el maestro. Normalmente, el sistema de control bilateral emplea realimentación a las articulaciones del manipulador maestro de los esfuerzos del esclavo, con el objetivo de conseguir un acoplamiento entre ambos manipuladores.

Existen diversos investigadores que han trabajado en técnicas de cinestesia y “percepción propia” con el objetivo de suministrar al teleoperador un sentido de movimiento y consciencia de miembros, diseñando mecanismos antropomorfos de

manipulación y estructuras de esqueletos que se colocan sobre el brazo del operador.

El término telepresencia se refiere a una situación ideal en la que el operador se “siente” presente en la localización remota. En telepresencia es fundamental el empleo de mecanismos, tales como los comentados en el párrafo anterior, y sistemas de visualización que creen una “ilusión” de presencia al operador humano en la localización remota. El aspecto más específico de la telepresencia es la explotación de la interacción entre aspectos sensoriales y motores. Esta interacción se realiza mediante la integración de sensores y tecnologías de efectores.

Otro campo relacionado con la telepresencia, pero con una identidad propia fuera del marco de la robótica, es el de la realidad virtual. De forma general, puede considerarse que las tecnologías de realidad virtual permiten que el sistema informático y los procesos que controla sean transparentes al usuario.

2.8.1 Teleactuación

Existen diversos dispositivos para que el operador genere sus actuaciones de control. Es frecuente el empleo de los sistemas maestro-esclavo en los cuales el operador actúa moviendo el efector final de un manipulador maestro cuyos movimientos deben ser reproducidos por el efector final del manipulador esclavo. Se emplean manipuladores réplica del manipulador esclavo estableciéndose sistemas de control bilateral en los servos de las articulaciones correspondientes (Bejczy y Salisbury. 1983).

Se utilizan también manipuladores maestros diferentes del esclavo no sólo en su tamaño sino también en su configuración cinemática. El problema es que la diferencia entre las cinemáticas debe ser compensada por el sistema informático de control que debe realizar las transformaciones correspondientes.

Asimismo, se emplean dispositivos de entrada tales como “joysticks” de tres grados de libertad o esferas de control con seis grados de libertad (tres traslaciones y tres rotaciones) que miden las fuerzas y pares generados por el operador en cada eje de un sistema con su centroide ubicado en la esfera. En la Figura 2.14 se muestra una de estas esferas de control.

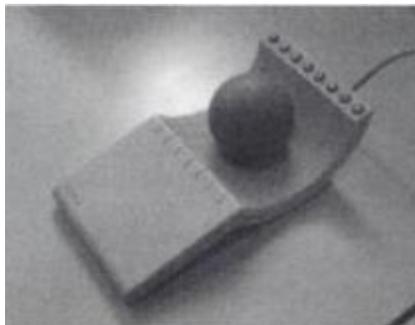


Figura 2.14 Esfera de control.

En el concepto de telepresencia se involucran no sólo los sensores sino sus acoplamientos con los actuadores que utiliza el operador humano para generar las órdenes, integrándose aspectos sensoriales y motores. Así, existen estructuras de brazos que se colocan sobre el operador, que se utilizan para generar automáticamente las consignas necesarias para el manipulador esclavo y su efector final. En este punto conviene mencionar la utilización de dispositivos concebidos en el campo de la realidad virtual, tales como guantes, que consisten en una combinación de sistemas de seguimiento electromagnéticos y fibras ópticas para monitorizar movimientos de dedos y la posición y orientación de la mano en el espacio. Existen también dispositivos de teleoperación basados en el empleo de sensores de electo Hall para registrar los movimientos de los dedos.

2.8.2 Diseño de sistemas de control de teleoperación

Los objetivos de diseño de un sistema de control de teleoperación son:

1) Hacer que el control manual del operador humano sea robusto ante retardos, saturación de los actuadores y otras no linealidades, e incluso ante los propios errores del operador.

2) Permitir elevadas prestaciones en la teleoperación (precisión, tiempo de teleoperación, comodidad) haciendo que los bucles de control tengan un comportamiento dinámico apropiado y reduciendo el trabajo del operador para lo cual se llega a realizar eventualmente de forma automática la acomodación y el control de esfuerzos en esquemas de control compartido. Nótese que la reducción del tiempo de teleoperación es importante ya que la ventana temporal de comunicaciones con la localización remota puede ser limitada, lo cual puede llegar a impedir que se complete la operación.

Un aspecto particularmente importante es la determinación de la información que se suministra al operador o, en otros términos. La definición de los bucles de teleoperación. En muchos sistemas, la información sensorial fundamental es la visual. Existen también numerosos sistemas que emplean información de proximetría.

Se han realizado experiencias que demuestran que la realimentación de esfuerzos al operador permite disminuir las fuerzas de contacto, el tiempo de teleoperación y el número de errores del operador (Hannaford, 1989).

La reflexión de esfuerzos a las articulaciones del manipulador maestro permite acoplar el operador cinestésicamente al entorno. Sin embargo, cuando existen retardos en la comunicación, la realimentación de esfuerzos puede afectar de forma negativa a la teleoperación. En (Ferrel 1966) se estudió por primera vez este problema, poniendo de manifiesto que retardos del orden de una décima de segundo eran suficientes para desestabilizar el sistema. En (Vertut et. al., 1981) se describen resultados de experimentos, poniendo de manifiesto que para que el sistema mantuviera la estabilidad sólo podía teleoperarse a velocidades muy bajas (solo 10 cm/s).

En (Whitney 1985) se pone también de manifiesto que los retardos hacen impracticable la teleoperación con realimentación de esfuerzos de los manipuladores espaciales desde tierra.

2.8.3 Teleprogramación e interacción con el entorno

En un sistema de teleprogramación (Funda y Paul. 1991) las acciones del operador en un entorno simulado se trasladan a una secuencia de instrucciones simbólicas para el robot remoto, que se transmiten para su ejecución retrasada en el tiempo en el sistema de control remoto. Las instrucciones simbólicas se diseñan teniendo en cuenta las posibles discrepancias entre el entorno y el modelo disponible en la estación de teleoperación.

Cuando el operador especifica una tarea en el entorno virtual, el sistema de teleprogramación debe interpretar las acciones del operador y producir la secuencia de instrucciones simbólicas. Para ello, se analizan las trayectorias de posición y fuerza, suministradas por el operador con un dispositivo apropiado de entrada, y las diferencias de estado entre la simulación del manipulador y el entorno.

2.8.4 Control de supervisión

Dentro del control por supervisión se engloban un conjunto de métodos de simulación, planificación y ayuda a la toma de decisiones, soportados por sistemas informáticos de ayuda al operador en la teleoperación (Sheridan. 1989). Dentro de estas funciones cabe distinguir entre las siguientes:

- Funciones fuera de línea: Simulación interactiva en tiempo real del teleoperador con realimentación de esfuerzos y realimentación visual. Estas tareas son normalmente complejas y requieren importantes recursos computacionales.
- Funciones de simulación en línea: Se emplean para previsión de maniobras y asignación a control manual o autónomo.
- Funciones de simulación en línea para compensación de retardos temporales: Se trata de que el operador pueda prever el efecto de los retardos para compensarlas de forma oportuna.
- Funciones de medida, estimación y visualización de estado: Entre estas funciones se encuentran las dedicadas a ofrecer una visualización más comprensible para el operador del estado de la operación. Se emplean también métodos para combinar de forma apropiada medidas de diversos sensores, información de estados precedentes y utilización de bases de datos con medidas y parámetros de teleoperación.
- Funciones de procesamiento de órdenes del operador Combinación de entradas analógicas y simbólicas según lenguajes específicos de control supervisado.
- Funciones de ajuste del sistema de control: Entre estas funciones se encuentran los ajustes de ganancias y otros parámetros del sistema de control

automático, tales como relaciones de fuerzas. Otras funciones que pueden incluirse en este grupo son las de guiado de realimentación sensorial, tales como la orientación de cámara, ajuste del zoom, etc.

- Ayudas para detección de fallos, identificación y respuestas de emergencia: Se involucran funciones de prevención, detección de comienzo de fallo, identificación de fallos, respuestas automáticas de emergencia, y recomendaciones para restauración de condiciones normales de operación.
- Monitorización de rendimiento: Se trata de obtener medidas de rendimiento, velocidad, precisión, resolución, tamaño, etc. Asimismo, es interesante establecer procedimientos de comparación de rendimiento manual y automático. Estas medidas son de interés en sistemas de aprendizaje monitorizado, que pueden emplearse como transición a modos de control automático.

2.8.5 Telesensorización

Se trata de entender la capacidad sensorial humana a una localidad remota empleando sensores y sistemas de presentación de la información.

En la telesensorización es necesario considerar tanto los sistemas sensoriales involucrados como la forma en que se presenta al operador la información.

Por lo que respecta a las funciones sensoriales, es necesario poner de manifiesto el importante papel que en la teleoperación juega la visión. En cualquier caso, la teleoperación involucra otras funciones sensoriales que se mencionan a continuación.

Así, la información suministrada por los sensores de proximetría puede mostrarse al operador en un monitor de teleoperación. Es aconsejable que la presentación de esta información sea tanto numérica como analógica, empleando una representación gráfica a color en una ventana del terminal del monitor.

El operador puede percibir también la proximidad empleando el sistema de visión.

Por otra parte, el sistema de visión autónoma involucra funciones de procesamiento de imágenes mediante las cuales es posible obtener medidas de proximidad. La dificultad obvia es la complejidad del procesamiento necesario.

Asimismo, es interesante la transmisión y visualización de la información de los sensores de contacto en un monitor de teleoperación. En numerosos trabajos de manipulación se recomienda reflejar los esfuerzos en los motores del manipulador maestro. En todo caso, cuando se disponga de sensores de esfuerzos, se considera interesante prever la transmisión de esta información y la visualización de los pares y fuerzas mediante técnicas de proximetría.

2.8.6 Trabajos relacionados

En esta sección se plantean los modelos, teorías y conceptos pertinentes al problema de investigación, de tal manera que fundamente el análisis y la interpretación del tema de tesis.

En el trabajo de (Cerón, 2005) se realiza una revisión general sobre los sistemas robóticos teleoperados, su estructura, componentes principales, clasificación, tipos de sensores, sistemas de locomoción y aplicaciones.

En el trabajo de (Martínez, 2013) se implementó un control basado en pasividad aplicado a la teleoperación háptica de un par de robot de dos grados de libertad para reducir el tiempo de retraso en la teleoperación y la exactitud del sistema teleoperado.

En (Jiménez, 2013) en dicho trabajo se realiza la instrumentación de un guante para aplicarlo a la teleoperación de una mano mecánica robotizada la cual será manipulada mediante sensores ubicados en el guante operado por un humano.

En el proyecto de (Marcano, 2008) se redacta de manera teórica las posibles interfaces que se pueden aplicar al estudio y aplicación de la telerrobótica y la teleoperación, generalizando en aspectos de software empleado en la teleoperación y además contemplado la cinemática tanto del robot como de la anatomía humana, la cual es importante al tratar de imitarla mediante maquinas inteligentes.

En el artículo de (Leaño, et al. 2014) nos habla sobre la necesidad de teleoperar un brazo robótico industrial para la ejecución de tareas de mantenimiento o de emergencia dentro de un reactor nuclear tipo modular, para lo cual emplean una interfaz háptica (relativa al tacto), donde primero se efectuaron pruebas de simulación y control y después solo se contempla la fase de construcción del dispositivo háptico y su comunicación simulada.

En (Carrasquilla, 2012) se emplea la teleoperación para un vehículo remoto en un medio de acceso inalámbrico mediante el uso de una interfaz háptica, en dicho proyecto se logró la teleoperación inalámbrica mediante la interfaz con bluetooth entre un vehículo móvil de Lego Mindstroms y un dispositivo háptico (Novint Falcon) el cual permite obtener sensaciones al operador y además se instrumentó el vehículo con dos sensores: uno de contacto y otro ultrasónico para la proximetría.

En (Escolano, 2011) se presenta un sistema de teleoperación multi-robot basado en una interfaz cerebro – computador que permite al usuario controlar de manera simultánea un numero definido de pequeños robots, únicamente con la actividad cerebral del usuario, cuyo proyecto está enfocado a ser aplicado en personas con deficiencias neuromusculares, con la finalidad de que el usuario pueda monitorear un espacio de trabajo o varias habitaciones con el uso de los robots.

En (Villa-Medina, et al. 2009) se presenta un vehículo robótico terrestre de cuatro ruedas para hacer recorridos sistemáticos de manera autónoma, con un

algoritmo de navegación basado en la información de un compás electrónico y un codificador óptico. Y también cuenta con un sensor ultrasónico para evitar colisiones con objetos en la ruta del vehículo. Por medio de un panel de control con una interfaz gráfica de usuario (GUI), programada en una asistente digital personal (PDA), se transmiten al vehículo una serie de puntos que forman el recorrido deseado. Los puntos se marcan en un espacio virtual en la GUI que representa la zona de trabajo del vehículo. La comunicación entre el robot y el panel de control, es un enlace bidireccional de radiofrecuencia mediante radio módems que permiten el intercambio de información. El vehículo robótico puede ser teleoperado de manera manual, en este caso la PDA se convierte en un control remoto convencional. El cambio de modo entre autónomo y manual puede hacerse en cualquier momento.

Capítulo 3 Instrumentación

La instrumentación forma parte de la electrónica, principalmente analógica, que se encarga del diseño y manejo de los aparatos electrónicos y eléctricos, sobre todo para su uso en mediciones. La instrumentación electrónica se aplica en el sensado y procesamiento de la información proveniente de variables físicas y químicas, a partir de las cuales realiza el monitoreo y control de procesos, empleando dispositivos y tecnologías electrónicas (Pallás, 2005).

3.1 Transductores, sensores y accionamientos

Se denomina transductor, en general, a todo dispositivo que convierte una señal de una forma física en una señal correspondiente pero de otra forma física distinta. Es, por tanto, un dispositivo que convierte un tipo de energía en otro. Esto significa que la señal de entrada es siempre una energía o potencia, pero al medir, una de las componentes de la señal suele ser tan pequeña que puede despreciarse, y se interpreta que se mide solo la otra componente.

Al medir una fuerza, por ejemplo, se supone que el desplazamiento del transductor es despreciable, es decir, que no se «carga» al sistema, ya que de lo contrario podría suceder que éste fuera incapaz de aportar la energía necesaria para el desplazamiento. Pero en la transducción siempre se extrae una cierta energía del sistema donde se mide, por lo que es importante garantizar que esto no lo perturba.

Dado que hay seis tipos de señales: mecánicas, térmicas, magnéticas, eléctricas, ópticas y moleculares (químicas), cualquier dispositivo que convierta una señal de un tipo en una señal de otro tipo debería considerarse un transductor, y la señal de salida podría ser de cualquier forma física «útil». En la práctica, no obstante, se consideran transductores a aquellos que ofrecen una señal de salida eléctrica.

Un sensor es un dispositivo que, a partir de la energía del medio donde se mide, da una señal de salida transducible que es función de la variable medida.

Sensor y transductor se emplean a veces como sinónimos, pero sensor sugiere un significado más extenso: la ampliación de los sentidos para adquirir un conocimiento de cantidades físicas que, por su naturaleza o tamaño, no pueden ser percibidas directamente por los sentidos. Transductor, en cambio, sugiere que la señal de entrada y la de salida no deben ser homogéneas. Para el caso en que lo fueran se propuso el término «modificador», pero no ha encontrado aceptación.

La distinción entre transductor de entrada (señal física/señal eléctrica) y transductor de salida (señal eléctrica/presentación) está prácticamente en desuso. La tendencia actual, particularmente en robótica, es emplear el término sensor (o captador en bibliografía francesa) para designar el transductor de entrada, y el término actuador o accionamiento para designar el transductor de salida. Los primeros pretenden la obtención de información, mientras que los segundos buscan la conversión de energía.

Así que se utilizará el término sensor para referirnos a los transductores de entrada. No se tratan los accionamientos o transductores de salida. A veces, sobre todo en el caso de la medida de magnitudes mecánicas, puede señalarse la presencia de elemento designado como sensor primario, que convierte la variable de medida en una señal de medida, siendo el sensor electrónico quien la convierte en una señal eléctrica. Un método para medir una diferencia de presiones, por ejemplo, consiste en emplear un diafragma cuya deformación se mide mediante una galga extensiométrica. En este caso el diafragma es el sensor primario y la galga hace la transducción. No obstante, se denomina transductor al conjunto de ambos elementos junto con su encapsulado y conexiones (Pallás, 2005).

3.1.1 Tipos de sensores

El número de sensores disponibles para las distintas magnitudes físicas es tan elevado que no se puede proceder racionalmente a su estudio sin clasificarlos previamente de acuerdo con algún criterio. Según el aporte de energía, los sensores se pueden dividir en moduladores y generadores. En los sensores moduladores o activos, la energía de la señal de salida procede, en su mayor parte, de una fuente de energía auxiliar. La entrada solo controla la salida. En los sensores generadores o pasivos, en cambio, la energía de salida es suministrada por la entrada (Pallás, 2005).

Los sensores moduladores requieren en general más hilos que los generadores, ya que la energía de alimentación suele suministrarse mediante hilos distintos a los empleados para la señal. Además, esta presencia de energía auxiliar puede crear un peligro de explosiones en algunos ambientes. Por contra, su sensibilidad se puede modificar a través de la señal de alimentación, lo que no permiten los sensores generadores. Según la señal de salida, los sensores se clasifican en analógicos o digitales. En los analógicos la salida varía, a nivel macroscópico, de forma continua. La información está en la amplitud, si bien se suelen incluir en este grupo los

sensores con salida en el dominio temporal. Si es en forma de frecuencia, se denominan, a veces, «casidigitales», por la facilidad con que se puede convertir en una salida digital.

En los sensores digitales, la salida varía en forma de saltos o pasos discretos. No requieren conversión A/D y la transmisión de su salida es más fácil. Tienen también mayor fidelidad y mayor fiabilidad, y muchas veces mayor exactitud, pero lamentablemente no hay modelos digitales para muchas de las magnitudes físicas de mayor interés.

Atendiendo al modo de funcionamiento, los sensores pueden ser de deflexión o de comparación. En los sensores que funcionan por deflexión, la magnitud medida produce algún efecto físico, que engendra algún efecto similar, pero opuesto, en alguna parte del instrumento, y que está relacionado con alguna variable útil. Un dinamómetro para la medida de fuerzas es un sensor de este tipo en el que la fuerza aplicada deforma un muelle hasta que la fuerza de recuperación de éste, proporcional a su longitud, iguala la fuerza aplicada.

En los sensores que funcionan por comparación, se intenta mantener nula la deflexión mediante la aplicación de un efecto bien conocido, opuesto al generado por la magnitud a medir. Hay un detector del desequilibrio y un medio para restablecerlo. En una balanza manual, por ejemplo, la colocación de una masa en un platillo provoca un desequilibrio, indicado por una aguja sobre una escala. El operario coloca entonces una o varias masas en el otro platillo hasta alcanzar el equilibrio, que se juzga por la posición de la aguja.

Las medidas por comparación suelen ser más exactas, porque el efecto conocido opuesto se puede calibrar con un patrón o magnitud de referencia de calidad.

En la Tabla 6 se consideran algunos criterios de clasificación y se dan ejemplos de sensores de cada clase. Cualquiera de estas clasificaciones es exhaustiva, y cada una tiene interés particular para diferentes situaciones de medida. Ahora bien, para el estudio de un gran número de sensores se suele acudir a su clasificación de acuerdo con la magnitud medida. Se habla, en consecuencia, de sensores de temperatura, presión, caudal, humedad, posición, velocidad, aceleración, fuerza, par, etc. Sin embargo, esta clasificación difícilmente puede ser exhaustiva ya que la cantidad de magnitudes que se pueden medir es prácticamente inagotable. Piénsese, por ejemplo, en la variedad de contaminantes químicos en el aire o en el agua, o en la cantidad de proteínas diferentes que hay en el cuerpo humano y que interesa detectar.

Tabla 6. Clasificaciones de los sensores (Pallás, 2005).

<i>Criterio</i>	<i>Clases</i>	<i>Ejemplos</i>
Aporte de energía	Moduladores Generadores	Termistor, Termopar
Señal de salida	Analógicos Digitales	Potenciómetro, Codificador de posición
Modo de operación	De deflexión, de comparación	Acelerómetro de deflexión, Servoacelerómetro

Desde el punto de vista de la ingeniería electrónica, es más atractiva la clasificación de los sensores de acuerdo con el parámetro variable: resistencia, capacidad, inductancia, añadiendo luego los sensores generadores de tensión, carga o corriente, y otros tipos no incluidos en los anteriores grupos. Si bien este tipo de clasificación es poco frecuente, pues permite reducir el número de grupos a unos pocos y se presta bien al estudio de los acondicionadores de señal asociados. En la Tabla 7 se consideran los sensores y métodos de detección ordinarios para las magnitudes más frecuentes.

Tabla 7. Sensores y métodos de detección ordinarios para las magnitudes más frecuentes

Sensores	Magnitudes								
	Posición Distancia Desplazamiento	Velocidad	Aceleración Vibración	Temperatura	Presión	Caudal Flujo	Nivel	Fuerza	Humedad
Resistivos	Potenciómetros Galgas Magnetorresistencias		Galgas + masa- resorte	RTD Termistores	Potenciómetros + tubo Bourdon	Anemómetros de hilo caliente Galgas + vola- dizo Termistores	Potencióme- tro + flota- dor Termistores LDR	Galgas	Humistor
Capacitivos	Condensador diferencial				Condensador variable + diafragma		Condensado r variable	Galgas capaci- tivas	Dieléctrico variable
Inductivos y electro- magnéticos	LVDT Corrientes Foucault Resolver Inductosyn Efecto Hall	Ley Faraday LVT Efecto Hall Corrientes Foucault	LVDT + masa- resorte		LVDT + dia- fragma Reluctancia variable + diafragma	LVDT + rota- metro Ley Faraday	LVDT + flo- tador Corrientes Foucault	Magneto- elástico LVDT + célula carga	
Generadores			Piezoeléctricos + masa-resorte	Termopares Piroeléctricos	Piezoeléctricos			Piezoeléct- ricos	
Digitales	Codificadores incrementales y absolutos	Codificadores incrementales		Osciladores de cuarzo	Codificador + tubo Bourdon	Vórtices			SAW
Uniones <i>p-n</i>	Fotoeléctricos			Diodo Transistor Convertidores T/l'			Fotoeléctric- os		
Ultrasonidos	Reflexión	Efecto Doppler				Efecto Doppler Tiempo tránsito Vórtices	Reflexión Absorción		

3.1.2 Acondicionamiento y presentación

Los acondicionadores de señal, adaptadores o amplificadores, en sentido amplio, son los elementos del sistema de medida que ofrecen, a partir de la señal de salida de un sensor electrónico, una señal apta para ser presentada o registrada o que simplemente permita un procesamiento posterior mediante un equipo o instrumento estándar. Consisten normalmente en circuitos electrónicos que ofrecen, entre otras funciones, las siguientes: amplificación, filtrado, adaptación de impedancias y modulación o demodulación.

Si se considera, por ejemplo, el caso en que una de las etapas de tratamiento de la señal de medida es digital, si la salida del sensor es analógica, que es lo más frecuente, hará falta un convertidor A/D. Éstos tienen una impedancia de entrada limitada, exigen que la señal aplicada sea continua o de frecuencia de variación lenta, y que su amplitud esté entre los límites determinados, que no suelen exceder de 10 V. Todas estas exigencias obligan a interponer un acondicionador de señal entre el sensor, que muchas veces ofrece señales de apenas unos milivolts, y el convertidor A/D.

La presentación de los resultados puede ser de forma analógica (óptica, acústica o táctil) o numérica (óptica). El registro puede ser magnético o sobre papel, e incluso electrónico (memorias eléctricas), y exige siempre que la información de entrada esté en forma eléctrica (Pallás, 2005).

3.1.3 Interfaces, dominios de datos y conversiones

En los sistemas de medida, las funciones de transducción, acondicionamiento, procesamiento y presentación, no siempre se pueden asociar a elementos físicos distintos. Además, la separación entre el acondicionamiento y el procesamiento puede ser a veces difícil de definir. Pero, en general, siempre es necesaria una acción sobre la señal del sensor antes de su utilización final. Con el término interfaz se designa, en ocasiones, al conjunto de elementos que modifican las señales, cambiando incluso de dominio de datos, pero sin cambiar su naturaleza, es decir, permaneciendo siempre en el dominio eléctrico.

Se denomina dominio de datos al nombre de una magnitud mediante la que se representa o transmite información. El concepto de dominios de datos y el de conversiones entre dominios, es de gran interés para describir los transductores y los circuitos electrónicos asociados (Malmstadt, et. al. 1981). En la Figura 3.1 se representa un diagrama con algunos de los posibles dominios, detallando en particular ciertos dominios eléctricos

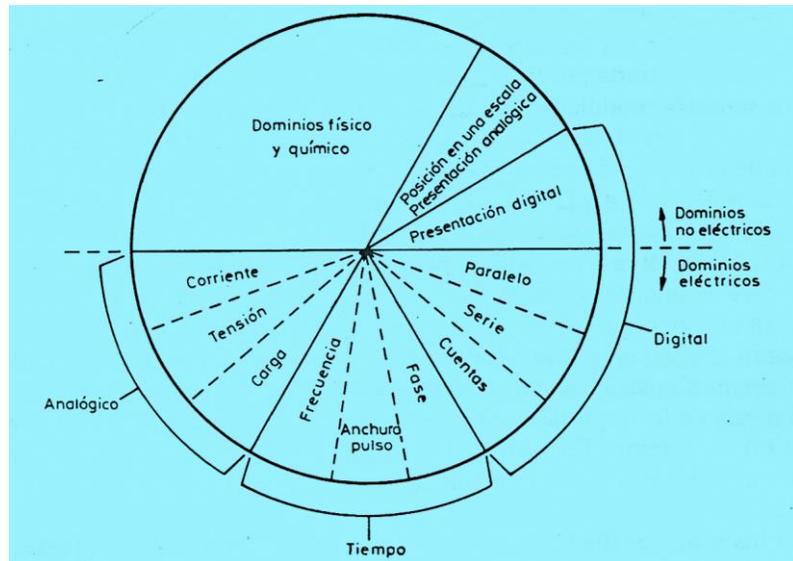


Figura 3.1 Dominios de datos.

En el dominio analógico, la información está en la amplitud de la señal, bien se trate de carga, corriente, tensión o potencia. En el dominio temporal, la información no está en las amplitudes de las señales, sino en las relaciones temporales: periodo o frecuencia, anchura de pulsos, fase. En el dominio digital, las señales tienen solo dos niveles. La información puede estar en el número de pulsos, o venir representada por palabras serie o paralelo codificadas.

El dominio analógico es, en general, el más susceptible a interferencias eléctricas. En el dominio temporal, la variable codificada no se puede medir, es decir, convertir al dominio de números, de forma continua, sino que hay que esperar un ciclo o la duración de un pulso. En el dominio digital, la obtención de números es inmediata.

La estructura de un sistema de medida refleja, pues, las conversiones entre dominios que se realizan, e influye particularmente en ella el que se trate de una medida directa o indirecta.

Una medida física es directa cuando se deduce información cuantitativa acerca de un objeto físico o acción mediante comparación directa con una referencia. A veces se puede hacer simplemente de forma mecánica, como en el caso de una balanza clásica.

En las medidas indirectas la cantidad de interés se calcula a partir de otras medidas y de la aplicación de la ecuación que describe la ley que relaciona dichas magnitudes. Los métodos empleados suelen ser siempre eléctricos. Es el caso, por ejemplo, de la medida de la potencia transmitida por un eje a partir de la medida del par y de la medida de su velocidad de rotación (Pallás, 2005).

3.2 Galgas extensiométricas

Las galgas extensiométricas se basan en la variación de la resistencia de un conductor o un semiconductor cuando es sometido a un esfuerzo mecánico. Este efecto fue descubierto por Lord Kelvin en 1856. Si se considera un hilo metálico de longitud l , sección A y resistividad ρ , su resistencia eléctrica R es:

$$R = \rho \frac{l}{A} \quad 9)$$

Si se le somete a un esfuerzo en dirección longitudinal, cada una de las tres magnitudes que intervienen en el valor de R experimenta un cambio y, por lo tanto, R también cambia de la forma:

$$\frac{dR}{R} = \frac{d\rho}{\rho} + \frac{dl}{l} - \frac{dA}{A} \quad 10)$$

El cambio de longitud que resulta de aplicar una fuerza F a una pieza unidimensional, siempre y cuando no se entre en la zona de fluencia (ver Figura 3.2), viene dado por la ley de Hooke,

$$\sigma = \frac{F}{A} = E\varepsilon = E \frac{dl}{l} \quad 11)$$

donde E es una constante del material, denominada módulo de Young, σ es la tensión mecánica y ε es la deformación unitaria, ε es adimensional, pero para mayor claridad se suele dar en «microdeformaciones» (1 microdeformación = $1 \mu\varepsilon = 10^{-6}$ m).

Si se considera ahora una pieza que además de la longitud l tenga una dimensión transversal t , resulta que como consecuencia de aplicar un esfuerzo longitudinal no solo cambia l sino que también lo hace t . La relación entre ambos cambios viene dada por la ley de Poisson, de la forma:

$$\mu = - \frac{dt/t}{dl/l} \quad 12)$$

donde μ es el denominado coeficiente de Poisson. Su valor está entre 0 y 0,5, siendo, por ejemplo, de 0,17 para la fundición maleable, de 0,303 para el acero y de 0,33 para el aluminio y el cobre. Obsérvese que para que se conservará constante el volumen debería ser $\mu = 0,5$.

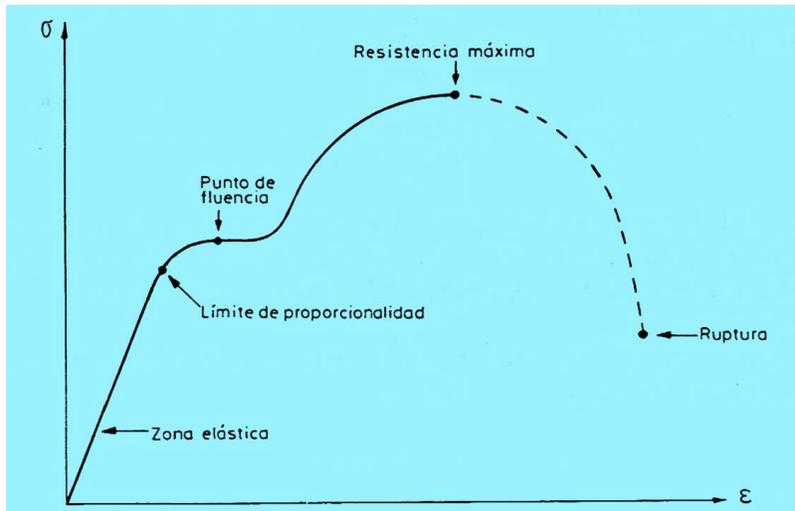


Figura 3.2 Relación entre esfuerzos y deformaciones. La escala de la zona elástica está muy ampliada.

Para el hilo conductor considerado anteriormente, si se supone una sección cilíndrica de diámetro D , se tendrá:

$$A = \pi D^2 / 4 \quad 13)$$

$$dA/A = 2dD/D = -2\mu dl/l \quad 14)$$

La variación que experimenta la resistividad como resultado de un esfuerzo mecánico es lo que se conoce como *efecto piezorresistivo*. Estos cambios se deben a la variación de la amplitud de las oscilaciones de los nudos de la red cristalina del metal. Si éste se tensa, la amplitud aumenta, mientras que si se comprime, la amplitud disminuye. Si la amplitud de las oscilaciones de los nudos aumenta, la velocidad de los electrones disminuye, y ρ aumenta. Si dicha amplitud disminuye, ρ también disminuye. Para el caso de los metales, resulta que los cambios porcentuales de resistividad y de volumen son proporcionales

$$\frac{d\rho}{\rho} = C \frac{dV}{V} \quad 15)$$

donde C es la denominada constante de Bridgman, cuyo valor es de 1,13 a 1,15 para las aleaciones empleadas comúnmente en galgas, y de 4,4 para el platino. Aplicando la ecuación 14, el cambio de volumen se puede expresar como:

$$V = \pi l D^2 / 4 \quad 16)$$

$$\frac{dV}{V} = \frac{dl}{l} + 2 \frac{dD}{D} = \frac{dl}{l} (1 - 2\mu) \quad 17)$$

y, por lo tanto, si el material es isótropo y no se rebasa su límite elástico, la ecuación 10 se transforma finalmente en:

$$\frac{dR}{R} = \frac{dl}{l} [1 + 2\mu + C(1 - 2\mu)] = K \frac{dl}{l} \quad 18)$$

donde K es el denominado factor de sensibilidad de la galga, definido directamente como el factor dentro del corchete en la expresión anterior. A partir de los valores dados se ve que K es del orden de 2, salvo para el platino (K = 6) y el isoelástico (K=3,5).

Así, para pequeñas variaciones la resistencia del hilo metálico deformado puede ponerse de la forma

$$R = R_0(1 + x) \quad 19)$$

donde R_0 es la resistencia en reposo y $x = K\varepsilon$. El cambio de resistencia no excede del 2%.

En el caso de un semiconductor, al someterlo a un esfuerzo predomina el efecto piezorresistivo (Kanda, 1991). Las expresiones de la relación resistencia-deformación son para un caso concreto:

-para un material tipo p

$$\frac{dR}{R_0} = 119,5\varepsilon + 4\varepsilon^2 \quad 19)$$

-para un material tipo n

$$\frac{dR}{R_0} = 110\varepsilon + 10\varepsilon^2 \quad 20)$$

donde R_0 es la resistencia en reposo a 25°C, y se supone una alimentación a corriente constante.

Se observa que existe una relación entre el cambio de resistencia de un material y la deformación que experimente éste. Si se conoce la relación entre esta deformación y el esfuerzo que la provoca, a partir de la medida de los cambios de resistencia se podrán conocer los esfuerzos aplicados y, en su caso, las magnitudes que provocan dichos esfuerzos en un sensor apropiado. Un resistor dispuesto de forma que sea sensible a la deformación constituye una galga extensiométrica.

Las limitaciones que cabe considerar en la aplicación de este principio de medida son numerosas y conviene conocerlas con detalle, pues de lo contrario es difícil obtener información útil con este método que durante años ha demostrado ser sumamente valioso.

En primer lugar, el esfuerzo aplicado no debe llevar a la galga fuera del margen elástico de deformaciones. Éste no excede del 4% de la longitud de la galga y va desde unas 3000 $\mu\varepsilon$ para las semiconductoras a unas 40.000 $\mu\varepsilon$ para las metálicas.

En segundo lugar, la medida de un esfuerzo solo será correcta si es transmitido totalmente a la galga. Ello se logra pegando ésta cuidadosamente mediante un adhesivo elástico que sea suficientemente estable con el tiempo y la temperatura. A la vez, la galga debe estar aislada eléctricamente del objeto donde se mide y protegida del ambiente.

Se supone también que se está en un estado plano de deformaciones, i.e. que no hay esfuerzos en la dirección perpendicular a la superficie de la galga. Para que la resistencia eléctrica de ésta sea apreciable se disponen varios tramos longitudinales y en el diseño se procura que los tramos transversales tengan mayor sección (ver Figura 3.3), pues así se reduce la sensibilidad transversal a un valor de sólo el 1 o el 2% de la longitudinal. En la Figura 3.4 se muestra la forma convencional de montar una galga (Pallás, 2005).

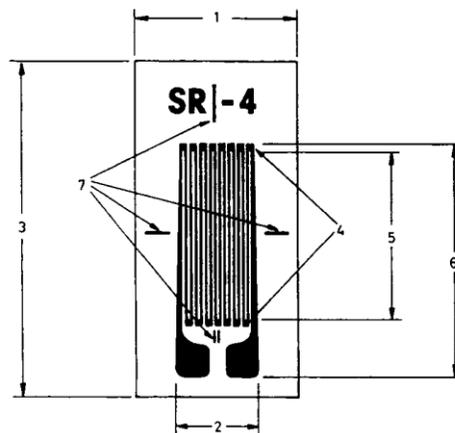


Figura 3.3 Parámetros de una galga impresa (BLH Electronics). 1 Anchura del soporte; 2 anchura de la galga; 3 longitud del soporte; 4 extremos ensanchados; 5 longitud activa; 6 longitud total de la galga; 7 marcas de alineación.

La temperatura es una fuente de interferencias por varias razones. Afecta a la resistividad y módulo de elasticidad del material, a sus dimensiones y a las dimensiones del soporte. Como resultado de todo ello, una vez la galga está dispuesta en la superficie de medida, si hay un cambio de temperatura, antes de aplicar ningún esfuerzo se tendrá ya un cambio de resistencia. En galgas metálicas este cambio puede ser de hasta $50 \mu\epsilon/^\circ\text{C}$.

Esta interferencia se compensa con el método de la entrada «opuesta». Consiste en este caso en el empleo de las denominadas galgas «pasivas», que son galgas iguales a la de medida dispuesta junto a ésta, de forma que experimentan el mismo cambio de temperatura, pero que no están sometidas a esfuerzos mecánicos. En cualquier caso, para evitar dilataciones diferenciales excesivas, en cada material a ensayar hay que emplear galgas previstas para él, es decir, que tengan un coeficiente de dilatación similar.

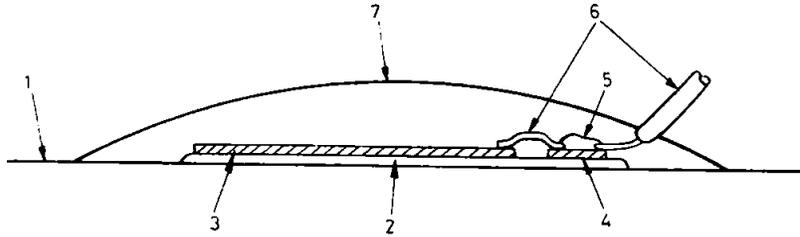


Figura 3.4 Montaje de una galga impresa (BLH Electronics). 1. Sustrato donde se monta; 2. Adhesivo; 3. Galga; 4. Terminales para soldar; 5. Soldadura; 6. Hilos de conexión; 7. Aislamiento protector.

En galgas semiconductoras este efecto de la temperatura es muy acusado. En las denominadas galgas autocompensadas se compensa el aumento de la resistividad con la temperatura con una disminución de la resistencia debido a la expansión del material soporte. Se logran así deformaciones térmicas de solo $5 \mu\epsilon/^\circ\text{C}$ en un margen de temperatura de unos 20°C .

Un factor que puede provocar el calentamiento de la galga es la propia potencia que disipe cuando, al medir su resistencia, se haga circular por ella una corriente eléctrica. En las galgas metálicas la corriente máxima es de unos 25 mA si el soporte es buen conductor del calor (acero, cobre, aluminio) y de 5 mA si es mal conductor (plástico, madera). La potencia permitida aumenta con el área de la galga y va desde $0,77 \text{ W/cm}^2$ a $0,15 \text{ W/cm}^2$, según el soporte. En las galgas semiconductoras, la potencia máxima disipable es de unos 250 mW.

Otra fuente de interferencia son las fuerzas termo electromotrices presentes en la unión de dos metales distintos, ya que pueden dar una tensión de salida superpuesta a la de interés si se alimenta la galga con corriente continua. Su presencia se reconoce si cambia la salida al variar la polaridad de la alimentación. Deben corregirse bien mediante el método de insensibilidad intrínseca, por selección de materiales, bien mediante filtrado, a base de alimentar las galgas con corriente alterna.

Idealmente, las galgas deberían ser puntuales para poder medir los esfuerzos en un punto concreto. En la práctica sus dimensiones son apreciables, y se supone que el «punto» de medida es el centro geométrico de la galga. Si se van a medir vibraciones, la longitud de onda de éstas debe ser mucho mayor que la longitud de la galga. Si, por ejemplo, ésta es de 5 mm y se mide en acero, donde la velocidad del sonido es de unos 5900 m/s, la máxima frecuencia medible es del orden de 100 kHz ($1 \text{ MHz}/10$).

Si se mide en una superficie no uniforme, como el hormigón, puede interesar, en cambio, realizar un promediado de deformaciones para no caer en error debido a una singularidad en la superficie.

Las galgas extensiométricas de silicio son sensibles a la luz, si bien la magnitud de los efectos ópticos probablemente sea despreciable en las condiciones de iluminación habituales.

Frente a todas estas posibles limitaciones, por su pequeño tamaño, gran linealidad y también por su baja impedancia, las galgas extensiométricas son uno de los sensores con mayor aplicación.

3.3 Microacelerómetros

Los acelerómetros se definen como sensores que miden la aceleración lineal a lo largo de su eje sensible. Estos tienen un enorme potencial en los sistemas de seguridad de la industria automotriz tales como: en la activación de las bolsas de aire, en los sistemas de suspensión activa y control de tracción, cinturón de seguridad y alarma antirrobo (Kraft, 2000), (Kuisma, 2001). Además, son utilizados en sismografía, en navegación, en la milicia, en vulcanología, en la exploración petrolera, en robótica, en la vigilancia de las vibraciones de máquinas industriales, en el control de la calidad del transporte de mercancías, en los sistemas de estabilización de imágenes para cámaras, en aplicaciones de realidad virtual, en iPhone, juguetes electrónicos, entre otras (Beeby, 2004), (Marek, 1999), (Yazdi, Ayazi, y Najafi, 1998). En la actualidad con los adelantos de la tecnología MEMS (Sistemas Microelectromecánicos) es posible contar con microacelerómetros que presentan las siguientes ventajas: menor costo, tamaño pequeño, alta sensibilidad y un mínimo consumo de potencia que los posiciona en un lugar privilegiado para poder abarcar la mayoría de las aplicaciones antes mencionadas.

La industria automotriz fue la primera en producir microacelerómetros en grandes volúmenes. Los procesos de fabricación de estos sensores son compatibles con los procesos de fabricación de los circuitos integrados (CI). Esto permite que los transductores se fabriquen junto con su circuitería electrónica en el mismo sustrato, obteniendo resultados más confiables y una mayor eficiencia en su funcionamiento. Existen varias compañías que producen microacelerómetros en grandes volúmenes. Uno de los productos más exitosos en el mercado es la serie de ADXL de Analog Devices Inc. Esta compañía es líder mundial en la fabricación de microacelerómetros para el sector automotriz. En la Figura 3.5 se ilustran algunas de las aplicaciones de los microacelerómetros en la industria automotriz (Chaehoi, 2005).

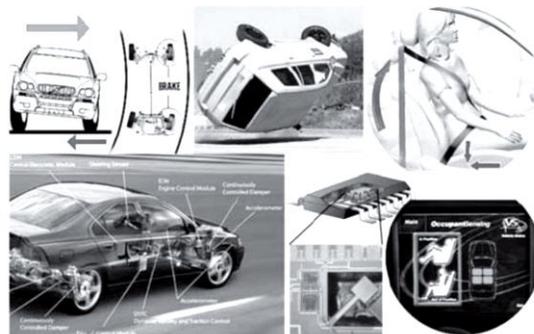


Figura 3.5 Ilustración de algunas de las aplicaciones de los microacelerómetros en la industria automotriz (Chaehoi, 2005).

CLASIFICACIÓN DE LOS MICROACELERÓMETROS

Los microacelerómetros se pueden clasificar en los siguientes siete grupos según sus mecanismos de transducción:

- Piezoresistivos.
- Capacitivos.
- Corriente de efecto túnel.
- Piezoeléctricos.
- Ópticos.
- Térmicos.
- Resonantes.

Las primeras seis clases de acelerómetros tienen su masa de prueba en reposo cuando éstos no experimentan aceleración y la transducción mecánica a eléctrica se realiza por medio del movimiento de su masa sísmica. Mientras que los acelerómetros resonantes tienen elementos continuamente en resonancia para detectar la aceleración externa (Herrera, Cortés y Aguilera, 2008).

3.3.1 Microacelerómetro piezoeléctrico

Esta clase de sensores detectan la aceleración con base a la carga eléctrica generada en un material piezoeléctrico al ser sometida a un esfuerzo mecánico. Los materiales piezoeléctricos como el óxido de Zinc (ZnO), nitruro de Aluminio (AlN) y el PZT (Piezoelectriclead Zirconate Titanate, por sus siglas en inglés) al ser sometidos a tensiones mecánicas adquieren una polarización eléctrica, lo que provoca una diferencia de potencial y cargas eléctricas en su superficie.

Es posible implementar acelerómetros usando materiales piezoeléctricos y tecnologías de micromaquinado. A diferencia de los microacelerómetros piezoresistivos, los piezoeléctricos son dispositivos activos, ya que éstos generan su propia potencia y teóricamente no necesitan suministro de potencia eléctrica.

La Figura 3.6 muestra la estructura básica de un microacelerómetro piezoeléctrico, que utiliza una película delgada de material piezoeléctrico (PZT) depositada entre la masa sísmica y el electrodo inferior. La masa sísmica ejerce una fuerza sobre el material piezoeléctrico cuando experimenta una aceleración en la dirección de polarización del material. La fuerza sobre el material piezoeléctrico genera una carga eléctrica que puede ser detectada por un amplificador.

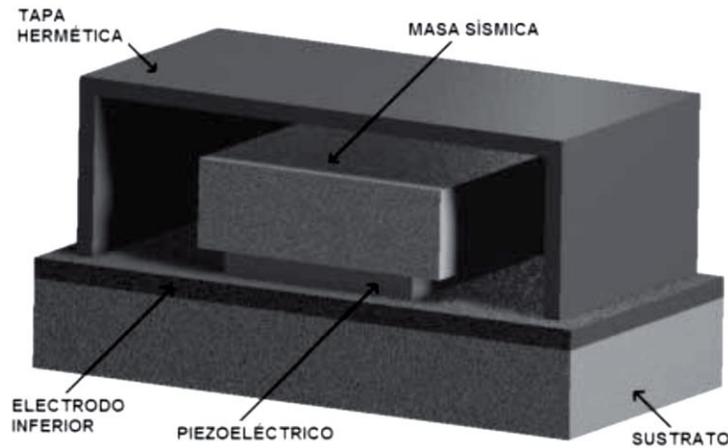


Figura 3.6 Estructura básica de un microacelerómetro piezoeléctrico.

Un microacelerómetro piezoeléctrico tipo voladizo se ilustra en la Figura 3.7. En éste, una viga en voladizo actúa como masa sísmica y elemento sensor. La estructura de la viga está compuesta de polisilicio dopado en boro, una película de nitruro de silicio (Si_3N_4), otra de óxido de Zinc (ZnO) y una de Platino (Pt) en la parte superior (DeVoe y Pisano, 2001). En este caso el ZnO actúa como el material piezoeléctrico. Cuando una aceleración es aplicada se origina una deflexión en la viga, lo cual genera esfuerzos mecánicos en su material piezoeléctrico (ZnO) y genera una carga eléctrica en ella. Entonces, un amplificador detecta la carga eléctrica (Herrera, et. al. 2008).

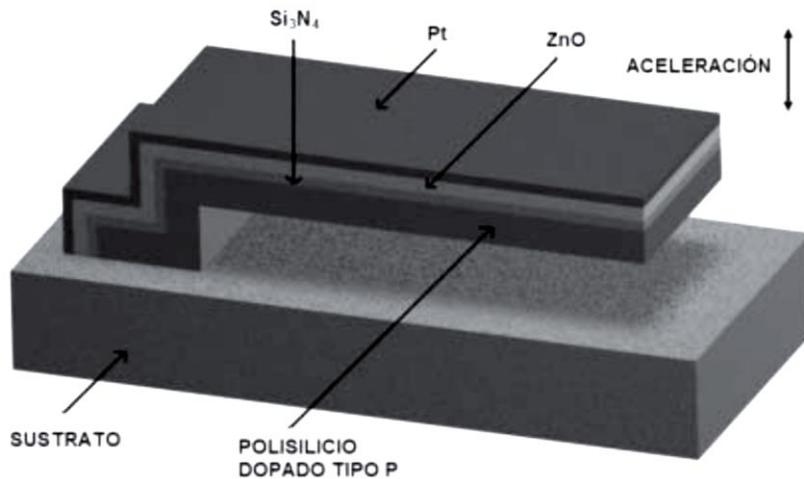


Figura 3.7 Estructura de un microacelerómetro piezoeléctrico tipo viga en voladizo (DeVoe y Pisano, 2001).

Los microacelerómetros piezoeléctricos tienen la ventaja de utilizar muy baja potencia y de tener una integración monolítica con el circuito electrónico. Sin embargo, los coeficientes piezoeléctricos (que determina la sensibilidad) del material sensible son dependientes de la temperatura. Por lo que, la compensación de la temperatura es necesaria para esta clase de microacelerómetros (Dvoe et al., 2001) desarrollaron dos técnicas de fabricación para integrar películas de ZnO en la superficie de estructuras micromaquinadas que funcionan como microacelerómetros. Este dispositivo registró una no linealidad menor del 2 % FS y una sensibilidad de 0,21 fC/g para aceleraciones menores del $\pm 25g$.

3.4 Microgiroscopios

En simples términos, el giroscopio es un sensor que mide el rango de rotación de un objeto. El nombre “giroscopio” fue idea de Léon Foucault, combinó la palabra griega “skopeein” que significa ver y la palabra griega “gyros” que significa rotación, durante sus experimentos para medir la rotación de la Tierra.

Los primeros giroscopios, como el giroscopio de Sperry, y muchos otros modernos giroscopios de la época utilizan el momento de rotación de una rueda unida a la estructura de un cardán. Sin embargo, la rueda que hace rotar a los giroscopios tiene muchas desventajas, la primera de ellas es que tiene fricción en los baleros. Los giroscopios vibrantes, como el giroscopio de resonador hemisférico (HRG por sus siglas en inglés) y el giroscopio de diapasón presentan una efectiva solución a los problemas con rodamientos debido a la eliminación de las partes rotativas.

Las tecnologías de punta alternativas como el giroscopio de fibra óptica (FOG por sus siglas en inglés) o el giroscopio de anillo laser (RLG por sus siglas en inglés) están basados en el efecto Sagnac, los cuales también han sido desarrollados.

3.4.1 Giroscopios de velocidad vibratoria micromecanizada

Aunque existe una gran variedad de diseños de giroscopios micromecanizados y principios de funcionamiento, la mayoría de los giroscopios micromecanizados utilizan elementos mecánicos vibratorios para detectar la velocidad angular. El concepto de utilizar elementos vibratorios para inducir y detectar la fuerza de Coriolis presenta muchas ventajas al no involucrar partes giratorias que requieren cojinetes y eliminar la fricción y el desgaste. Esa es la razón principal por la que los giroscopios vibratorios han sido exitosamente miniaturizados por el uso de procesos de micromecanización, y se han convertido en una alternativa atractiva a sus homólogos de macro escala (ver figura 3.8).

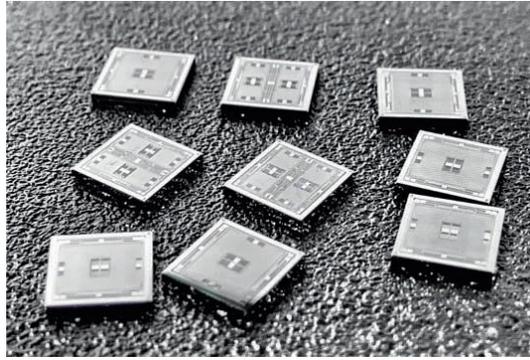


Figura 3.8 Dados de giroscopio micromecanizado, diseñados y fabricados en Laboratorio de microsistemas UCI. Cortesía de Alexander A. Trusov.

El principio de funcionamiento fundamental de los giroscopios vibratorios micromecanizados se basa en la fuerza sinusoidal de Coriolis inducida debido a la combinación de vibración de una masa de prueba y una entrada de velocidad angular ortogonal. La masa de prueba está suspendida generalmente por encima del sustrato mediante un sistema de suspensión que consiste en vigas flexibles. El sistema dinámico global es típicamente un sistema amortiguador de masa de dos grados de libertad (2-DOF), donde la fuerza de Coriolis inducida por la rotación hace que la transferencia de energía al modo de detección sea proporcional a la entrada de velocidad angular. Cuando el giroscopio se somete a una rotación angular, se induce una fuerza de Coriolis sinusoidal a la frecuencia de accionamiento en la dirección ortogonal a la oscilación del modo de accionamiento y al eje de la velocidad angular.

Idealmente, se desea utilizar resonancia tanto en los modos de accionamiento como en los modos de detección para lograr la máxima ganancia y sensibilidad de respuesta posible. Esto se logra típicamente diseñando y si es necesario sintonizando la unidad y detectando las frecuencias de resonancia para que coincidan (ver figura 3.9). Alternativamente, el modo de detección está diseñado para ser desplazado ligeramente del modo de accionamiento para mejorar la robustez y la estabilidad térmica, sacrificando intencionalmente la ganancia y la sensibilidad.

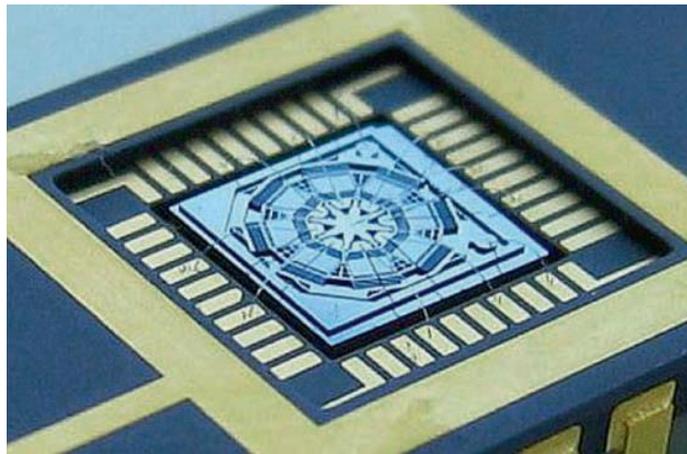


Figura 3.9 Un chip de giroscopio MEMS empaquetado. La estructura tridimensional de la microescala se forma de un solo cristal de sustrato del silicio, completo con las masas de prueba móviles, vigas de la suspensión, actuadores y detectores.

Aunque el aumento de la separación entre las frecuencias de impulsión y de detección reduce el impacto de las variaciones en los parámetros del sistema oscilatorio que desplazan las frecuencias naturales y los valores de amortiguación, los errores resultantes aún requieren compensación mediante arquitecturas avanzadas de control y procesamiento de señales.

A continuación se muestra la estructura interna del giroscopio MPU6050 (ver figura 3.10), utilizado para este proyecto el cual es fabricado por la empresa InvenSense.

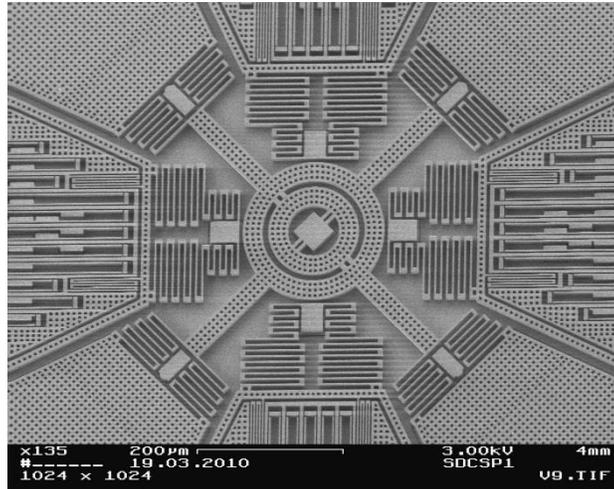


Figura 3.10 Estructura interna del MEM MPU6050.

3.5 Dispositivos de instrumentación utilizados para la captura de movimiento

Para poder llevar a cabo la teleoperación del manipulador de cinco grados de libertad se requieren los siguientes dispositivos: una tarjeta de control para los servomotores del robot, una fuente de alimentación para el controlador de los servomotores, un sistema embebido para llevar a cabo la programación, una galga extensiométrica, dos giroscopios acelerómetros MPU6050 y un potenciómetro.

3.5.1 Tarjeta de control de los servomotores

La tarjeta de control para los servomotores tiene la capacidad de controlar 32 servomotores al mismo tiempo, ya sea usando el software del controlador (ya que el controlador cuenta con su propio software elaborado en mandarín) o una comunicación UART (puerto serie TTL) de MCU (Arduino, 51, AVR, ARM, FPGA, PIC, etc.) para enviarle los comandos de control al microcontrolador. A continuación se mencionan las características con las que cuenta la tarjeta de control (ver figura 3.11):

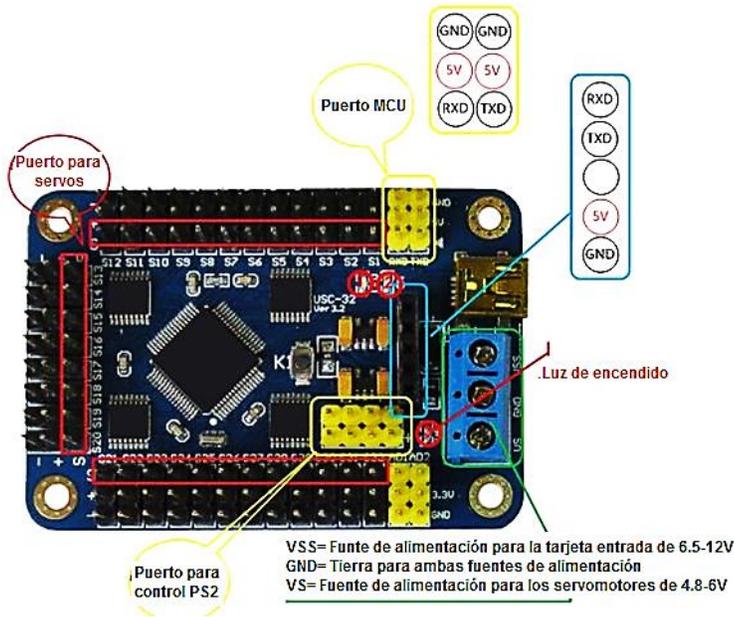


Figura 3.11 Tarjeta de control para los servomotores del manipulador.

- La alimentación del controlador tiene dos terminales una para alimentar al controlador (6 a 12VCD) y otra para alimentar a los servomotores (4.5-8VCD), la alimentación al controlador no es necesaria cuando se conecta al puerto USB de la computadora.
- Cuenta con 32 canales para los servomotores los cuales pueden ser controlados al mismo tiempo y se puede también ajustar su precisión.
- Puerto de comunicación USB o UART (TTL o USART) ver figura 3.12.
- Señales de control de salida de PWM de 0.5 μ s.
- La tarjeta se ajusta automáticamente al rango de baudios de comunicación serial (9600, 19200, 28400, 115200, 128000).
- Soporta servomotores de varias marcas como: Futaba, Hitec, Hobbico etc.
- Cuenta con una memoria interna con soporte para varias instrucciones.

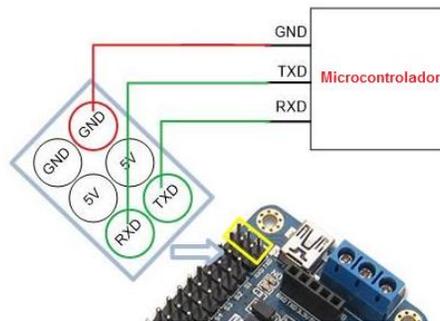


Figura 3.12 Puerto de comunicación serial UART de la tarjeta de control.

3.5.2 Etapa de potencia de la tarjeta de control

La etapa de potencia de la tarjeta de control o fuente de alimentación (ver figura 3.13) es suministrada por un eliminador de voltaje, el cual tiene con las siguientes características:

- Alimentación: 100 / 240 Vca 50-60 Hz
- Salida: 3 / 4,5 / 6 / 7,5 / 9 / 12 Vcc
- Potencia: 30 W
- Corriente: 2,5 Amperes (3 / 4,5 / 6 / 7,5 V)
- 1,8 Amperes (9 / 12 V)
- Dimensiones: 5,9 x 8,2 x 3,4 cm



Figura 3.13 Etapa de potencia para la tarjeta de control del manipulador.

3.5.3 Sistema embebido

Se conoce como sistema embebido a un circuito electrónico computarizado que está diseñado para cumplir una labor específica en un producto. La inteligencia artificial, secuencias y algoritmos de un sistema embebido, están residentes en la memoria de una pequeña computadora denominada microcontrolador.

A diferencia de los sistemas computacionales de oficina, estos sistemas solucionan un problema en específico y están en todos los ambientes posibles de la vida cotidiana.

Es común encontrar sistemas embebidos en los vehículos; por ejemplo, controlando el sistema de inyección de combustible, en los sistemas de frenado ABS (Anti-lock Braking Systems), en el control de espejos, sistemas de protección contra impacto (Airbag), alarmas contra robo, sistemas de ubicación entre otros. También en los electrodomésticos de uso diario: controlando la temperatura en refrigeradores, estufas, hornos de microondas y planchas; en el motor de licuadoras, lavadoras de ropa, lavaplatos, aspiradoras y juguetes; en los equipos celulares, agendas de bolsillo, PDA, cajeros automáticos, cámaras fotográficas, reproductores de música y video, equipo médico, y en general en una gran cantidad de dispositivos de uso diario (Galeano, 2014).

Se sabe que en general, un consumidor promedio interactúa con alrededor de 400 microcontroladores por día; ese número tiende a crecer significativamente para los próximos años, considerando que los procesadores son cada vez más pequeños,

consumen menos energía y el precio es menor gracias a la economía de escala aplicada a su fabricación, aspectos que ayudan a remplazar en mayor proporción los sistemas lógicos, los equipos electromecánicos y en el futuro, se podrán incorporar en los equipos desechables.

Los sistemas embebidos que se utilizan en este proyecto de tesis son las tarjetas NUCLEO-F446RE y la NUCLEO-F441RE seleccionadas debido a que cuentan con muchas ventajas en cuanto a su programación, velocidad de procesamiento, buses de comunicación y simplicidad.

Las tarjetas NUCLEO-F4XXRE (ver figura 3.14) pertenecen a la familia de tarjetas de la compañía STMicroelectronics STM32 Nucleo la cual representa una manera económica y flexible para los usuarios a probar nuevas ideas y construir prototipos con cualquier microcontrolador STM32, eligiendo entre las distintas combinaciones de rendimiento, consumo de energía y características. Cuentan además con soporte de conectividad Arduino™ y las cabeceras ST Morpho hacen que sea fácil para ampliar la funcionalidad de la plataforma de desarrollo abierta STM32 Nucleo con una amplia variedad de accesorios especializados. El microcontrolador de la familia STM32 Nucleo no requiere ninguna sonda separada ya que integra el depurador ST-LINK / V2-1 y programador. El microcontrolador STM32 Nucleo viene con la amplia biblioteca de software HAL STM32 junto con varios ejemplos de software empaquetado, así como el acceso directo a los recursos en línea mbed.

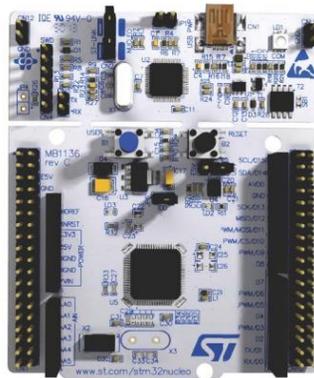


Figura 3.14 Sistema embebido utilizado en este proyecto NUCLEO-F446RE.

La tarjeta NUCLEO-F446RE cuenta con las siguientes características: STM32F446RET6 en el paquete LQFP64, microcontrolador ARM de 32 bits CPU Cortex®-M4 con FPU, acelerador en tiempo real adaptativo (ART Acelerador), 180 MHz de frecuencia de CPU, VDD de 1,7 V a 3,6 V, 512 KB de memoria flash, 128 KB de SRAM, 4 KB de SRAM de respaldo, temporizadores de uso general (10), temporizadores de control avanzado (2), temporizadores (2), puertos SPI (4), puertos I2S (2), puertos USART (4), puertos UART (2), USB OTG de alta velocidad, puertos CAN (2), puertos EFS (2), puerto SPDIF-RX (1), puerto HDMI-CEC (1), puerto Quad SPI (1), interfaz de cámara, GPIO (50) con capacidad de interrupción externa, ADC 12 bits (3) con 16 canales, y DAC de 12 bits con 2 canales (ARM mbed Co b, 2016).

Por otro lado la tarjeta NUCLEO-F411RE cuenta con las siguientes características: STM32F411RET6 en el paquete LQFP64, microcontrolador ARM de 32 bits CPU Cortex®-M4 con FPU, 100 MHz de frecuencia de CPU, VDD de 1,7 V a 3,6 V, 512 KB de memoria flash, 128 KB de SRAM, GPIO (50) con capacidad de interrupción externa, ADC de 12 bits con 16 canales, reloj de tiempo real, temporizadores (8), puertos I2C (3), puertos USART (3), puertos SPI (5), USB OTG de alta velocidad y un puerto SDIO, (ARM mbed Co c. 2016).

Ambos sistemas embebidos son programados en un lenguaje de programación basado en C denominado “mbed”. Dicho software fue desarrollado por el fabricante de microcontroladores ARM con el objetivo de ser una plataforma en línea en donde los usuarios del mundo puedan compartir y crear librerías para una gran variedad de dispositivos ya que las tarjetas NUCLEO soportan una gran cantidad de sensores y actuadores, lo que lo hace un software en línea libre y gratuito.

3.5.4 Características técnicas de los sensores empleados en la instrumentación

- Galga extensiométrica

La idea de usar la galga extensiométrica se fundamenta en sus aplicaciones para mediciones de desplazamiento angular empleadas principalmente en robótica, los videojuegos de realidad virtual, dispositivos médicos, instrumentos musicales y terapia física, una de sus ventajas es su simplicidad y flexibilidad, sus especificaciones son las siguientes:

Mecánicas

- Ciclo de uso: > 1 millón
- Espesor: ≤ 0.43 mm
- Rango de temperatura soportada: -35°C a $+80^{\circ}\text{C}$

Eléctricas

- Resistencia: 10K Ohms $\pm 30\%$
- Resistencia de curvatura: mínimo 2 veces mayor que la resistencia plana a 180° .
- Potencia soportada: 0.5 Watts continuos; 1 Watt pico

Las dimensiones de la galga extensiométrica se presentan en la figura 3.15.

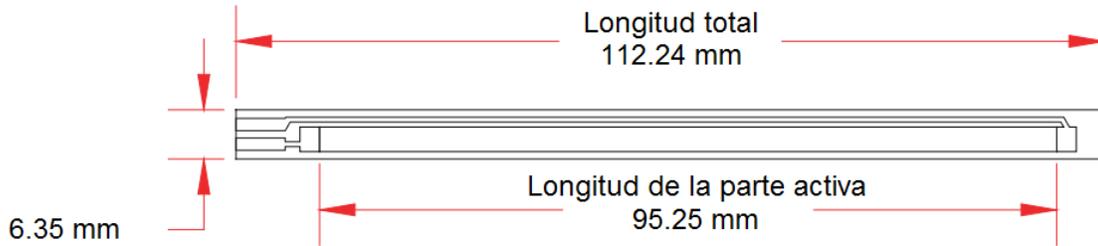


Figura. 3.15 Dimensiones de la galga extensiométrica.

La galga extensiométrica varía su resistencia al doblar dicho componente, un ejemplo de esta flexibilidad se aprecia en la figura 3.16 (Spectrasymbol, 2016).

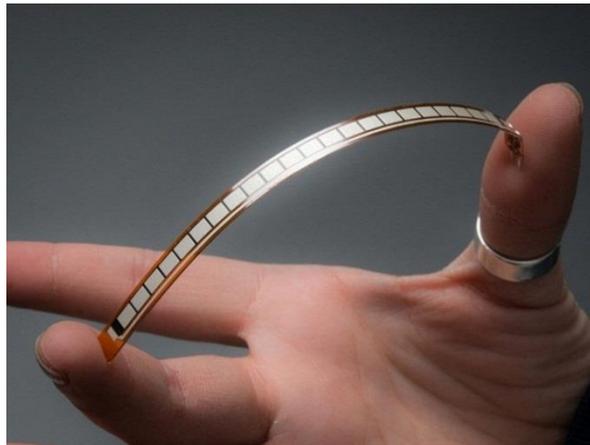


Figura. 3.16 Flexión de la galga extensiométrica.

Por ejemplo si la galga se encuentra en línea recta, su resistencia es muy pequeña, pero si la galga es doblada a 90 grados su resistencia se incrementa.

- Giroscopio/Acelerómetro MPU6050

El sensor giroscopio-acelerómetro MPU6050 (ver Figura 3.17) pertenece a la familia MPU-60X0, lo que lo convierte en el primer dispositivo integrado para la lectura de movimiento de seis ejes ya que el dispositivo combina tres ejes como giroscopio, tres ejes como acelerómetro y un procesador digital de movimiento (DMP por sus siglas en inglés), todo esto en un encapsulado de 4x4x0.9 mm, además utiliza el bus de comunicación dedicada I2C.

Otra de las características que distinguen al sensor MPU-6050 es porque cuenta con tres convertidores analógico digital de 16 bit para la digitalización de las salidas del giroscopio y también para las salidas del acelerómetro, también cuenta con un controlador FIFO de 1024 bytes el cual permite que el consumo de energía sea mínimo y que el registro de datos sea mayor (Invensense, 2016).



Figura. 3.17 Giroscopio-acelerómetro MPU-6050.

Características de giroscopio:

- Salida digital para los ángulos de rotación X, Y y Z con una escala programable de: ± 250 , ± 500 , ± 1000 , y $\pm 2000^\circ/\text{seg}$.
- Calibración automática con otros dispositivos mediante puerto FSYNC
- Tres convertidores analógico digital de 16 bit habilitados simultáneamente
- Baja sensibilidad al ruido
- Filtro pasa-bajas digitalmente programable
- Corriente de operación de 3.6 mA
- Corriente de espera de 5 μA
- Auto-examinación

Características del acelerómetro:

- Salida digital para los tres ejes del acelerómetro una escala programable de: $\pm 2g$, $\pm 4g$, $\pm 8g$ y $\pm 16g$
- Tres convertidores analógico digital de 16 bit habilitados simultáneamente
- Corriente normal de operación: 500 μA
- Bajo consumo de corriente
- Detección de la orientación
- Interrupciones programables
- Auto-examinación

Capítulo 4 Desarrollo

En el presente capítulo se implementa la teleoperación en un brazo robótico de cinco grados de libertad mediante la instrumentación del brazo humano por medio de sensores. Para el desarrollo del proyecto se siguió el procedimiento de la figura 4.1:



Figura 4.1 Procedimiento a seguir para el desarrollo del proyecto.

4.1 Diseño del soporte para el robot manipulador

Para la construcción del soporte del robot se tomaron las dimensiones de la base del mismo, para colocar al robot de tal manera que se asemeje a un brazo humano, el diseño fue realizado mediante el software CAD Solidworks 2016.

El robot que se utilizó para este proyecto está fabricado con una base de acrílico negro y soportes de aluminio cuyas dimensiones se aprecian en la figura 4.3, los eslabones son de aluminio y las articulaciones están adaptadas con la configuración de accionamiento directo a los servomotores, cuyas especificaciones se muestran en la Tabla 8:

Tabla 8. Especificaciones de los servomotores del manipulador

<i>Modelo</i>	<i>Velocidad</i> <i>sec/60deg</i>	<i>Torque</i> <i>Kg/cm</i>	<i>Peso</i> <i>gr</i>	θ
<i>HS-322HD</i>	0.15	3.7	42.81	θ_1
<i>HS-755HB</i>	0.23	13.2	110	θ_2
<i>HS-645MG</i>	0.20	9.6	55	θ_3
<i>HS-322HD</i>	0.15	3.2	42.8	θ_4
<i>HS-225BB</i>	0.11	4.8	26.93	θ_5
<i>HS-325HB</i>	0.15	3.7	42.81	Efector final

Para que el brazo robótico trabaje de la forma más parecida a un brazo humano, se optó por que el robot (ver figura 4.2a), se posicione de tal manera que los servomotores con los que cuenta el manipulador, no resulten afectados debido al exceso de peso del mismo robot. Por lo cual se eligió la postura más parecida a la de un brazo humano (ver figura 4.2b)



Figura. 4.2 a) Robot manipulador de 5 GDL b) Postura que adoptara el manipulador para asemejarse al brazo humano.

De esta manera se procedió al diseño de un soporte para colocar al manipulador tomando las medidas de la base del robot, las cuales se muestran en la figura 4.3. Una vez descritas las medidas de la base, se procede a medir la extensión total del manipulador la cual es de: 40.6 cm, por lo tanto se realiza el diseño del soporte empleando el software de diseño asistido por computadora denominado Solidworks versión 2016.

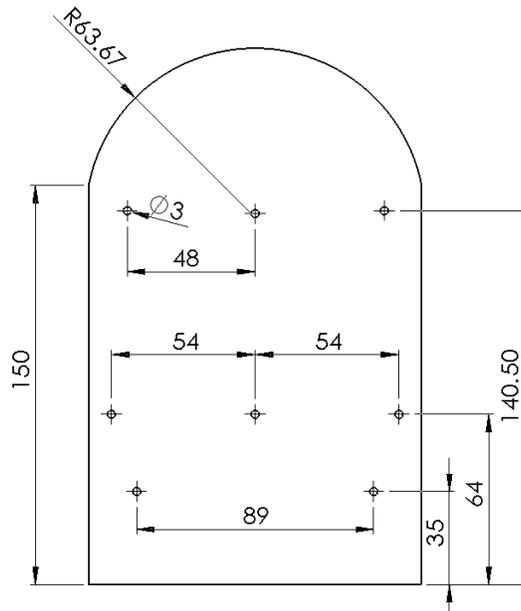


Figura. 4.3 Medidas de la base del robot manipulador de 5 GDL (los valores son dados en milímetros)

El diseño del soporte del manipulador se propuso con la finalidad de que este pudiera cambiar su altura para que el efector final del robot pueda adaptarse al medio de trabajo. La altura máxima configurable es de 50 cm y la altura mínima es de 35 cm con respecto a la base del robot como se muestra en la figura 4.4.

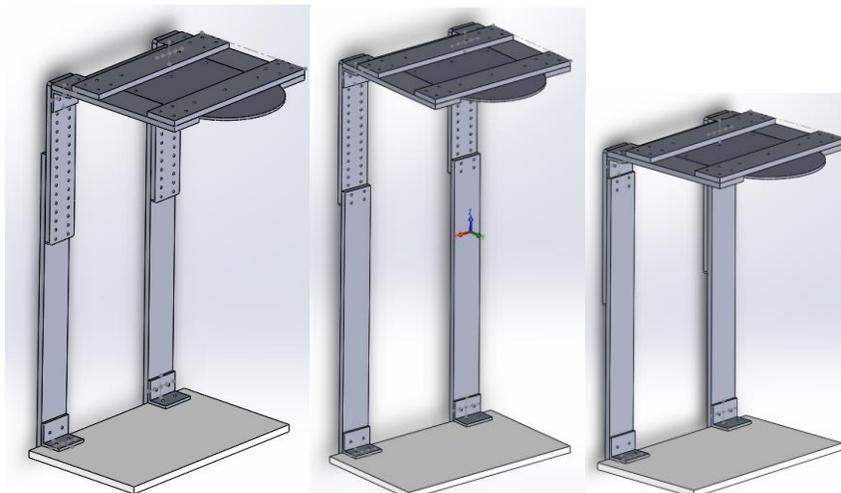


Figura. 4.4 Diseño CAD del soporte del robot, la primera imagen vista normal del diseño, segunda imagen altura máxima de la base, tercera imagen altura mínima de la base.

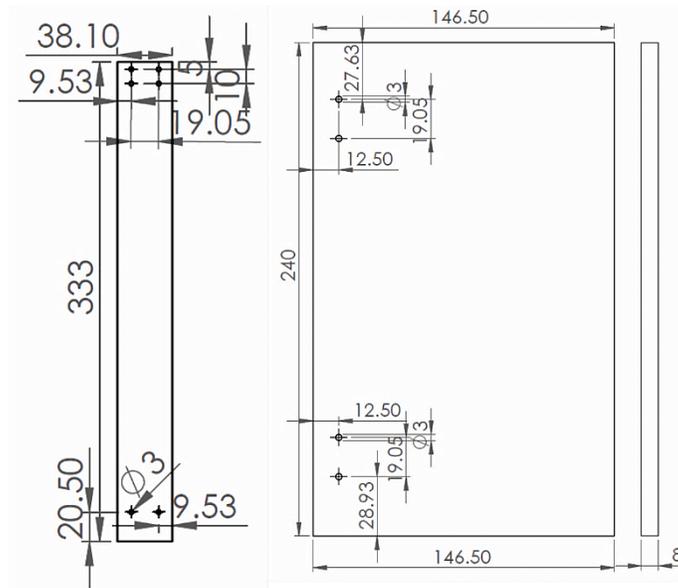


Figura 4.6 Medidas de la base para el soporte del manipulador de 5 GDL (las medidas están en milímetros).

4.1.1 Construcción del soporte del robot

El soporte del robot una vez diseñado, fue manufacturado en el CNC Chevalier de nuestra Universidad Politécnica de Puebla con aluminio debido a las características mecánicas que este material ofrece.

Después de diseñar el soporte del manipulador se procede a su construcción, para lo cual se emplea aluminio ya que es un material maleable y con bajo índice de oxidación y tornillería de acero para sujetar las piezas que conforman tanto la estructura como el soporte del robot. En la figura 4.7 se observa el prototipo terminado, el cual se empleará para efectuar la teleoperación.

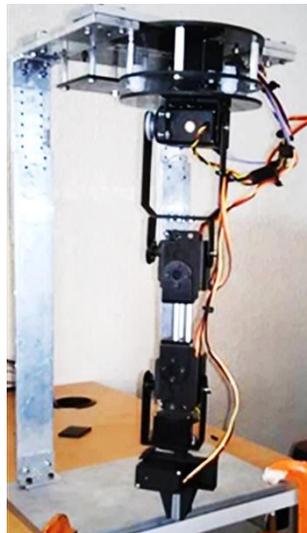


Figura. 4.7 Robot manipulador de 5 GDL colocado en el soporte diseñado y construido para este proyecto.

El robot sin el soporte (como se muestra en la figura 4.2 a) está conformado por los servomotores descritos anteriormente en la tabla 8, cuyos valores cambian respecto a su modelo, par motriz, velocidad de movimiento y peso.

Debido a que el robot debe adoptar una nueva postura para asimilar al brazo humano como se muestra en la figura 4.7 y realizando algunas pruebas de posicionamiento de los servomotores del manipulador tanto con su soporte, como sin él. Se examinó que el esfuerzo del par motriz aplicado sin su soporte es menor que el esfuerzo del par motriz aplicado con el soporte, esto debido a que la fuerza de gravedad y el peso del manipulador proporcional a la distancia de cada eslabón, afectan considerablemente al par motriz de los servomotores correspondientes a las articulaciones θ_1 , θ_3 y θ_4 del manipulador. Por lo anterior, se decidió cambiar los servomotores por otros con más par motriz de operación como se aprecia en letras rojas en la Tabla 9.

Tabla 9. Servomotores del brazo robótico modificado

<i>Modelo</i>	<i>Velocidad</i>	<i>Torque</i>	<i>Peso</i>	θ
	<i>sec/60deg</i>	<i>Kg/cm</i>	<i>gr</i>	
<i>TSX45</i>	0.17	10.9	51	θ_1
<i>HS-755HB</i>	0.23	13.2	110	θ_2
<i>TSX45</i>	0.17	10.9	51	θ_3
<i>S3003</i>	0.19	4.1	37.2	θ_4
<i>HS-225BB</i>	0.11	4.8	26.93	θ_5
<i>HS-325HB</i>	0.15	3.7	42.81	Efactor final

4.2 Cálculo del modelo cinemático

Uno de los objetivos del proyecto de tesis implica resolver la cinemática directa del manipulador de cinco grados de libertad, para poder obtener la orientación y posición del efector final del robot. Ya que la teleoperación utiliza esta información para llevar al robot a la orientación y posición deseadas en función de los sensores en el brazo instrumentado.

Para obtener la cinemática directa del manipulador se emplea el algoritmo descrito por Denavit-Hartenberg en 1955, del cual se obtienen las matrices de transformación homogéneas necesarias para describir la cinemática del robot, dicho procedimiento es descrito en (Barrientos 2006).

El procedimiento que se ha seguido para calcular la cinemática directa es el siguiente:

- a) Aplicar el algoritmo de Denavit Hartenberg al brazo robótico.
- b) Desarrollar los cálculos necesarios para obtener las matrices de transformación homogénea.
- c) Obtener las ecuaciones que describen la posición del robot.
- d) Programar en mbed las ecuaciones que describen la posición del robot.

Para obtener la cinemática directa del robot manipulador de cinco grados de libertad se debe aplicar lo descrito en (Denavit et. al. 1955). Dado que un robot se puede considerar como una cadena cinemática de objetos rígidos o eslabones unidos entre sí mediante articulaciones, se puede establecer un sistema fijo situado en la base del robot y describir la localización de cada uno de los eslabones con respecto a dicho sistema de referencia. De esta forma, el problema cinemático directo se reduce a encontrar una matriz homogénea de transformación T que relacione la posición y orientación del extremo del robot respecto del sistema de referencia fijo situado en la base del mismo, la matriz T está en función de las coordenadas articulares.

Según la convención de Denavit Hartenberg (ver anexo A1), escogiendo adecuadamente los sistemas de coordenadas asociados a cada eslabón, será posible pasar de un sistema al siguiente mediante 4 transformaciones básicas que dependen exclusivamente de las características geométricas del eslabón (ver figura 4.8).

Las cuatro transformaciones básicas son:

1. Rotación alrededor del eje z_{i-1} un ángulo θ_i .
2. Traslación a lo largo de z_{i-1} una distancia d_i
3. Traslación a lo largo de x_i una distancia a_i
4. Rotación alrededor del eje x_i un ángulo α_i

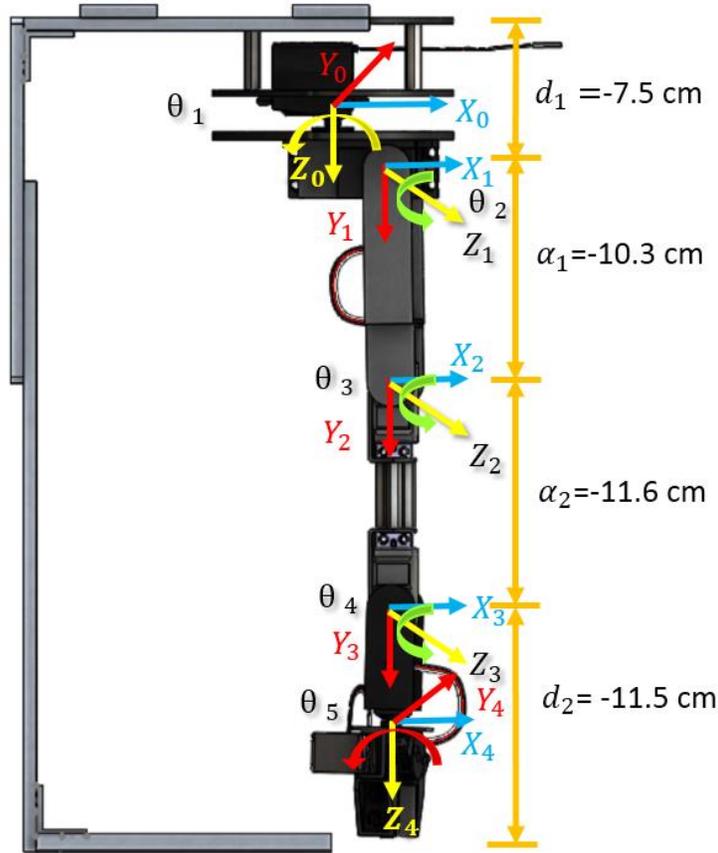


Figura. 4.8 Características geométricas de cada eslabón.

En la tabla 10, se presentan los parámetros obtenidos aplicando el algoritmo de Denavit-Hartenberg los cuales sirven para complementar las matrices de transformación homogénea y así obtener el modelo cinemático directo del manipulador.

Tabla 10. Parámetros del algoritmo D-H para el manipulador.

θ	d	α	a
$\theta_1 + 180$	-7.5 cm	90°	0
θ_2	0	0	-10.3 cm
θ_3	0	0	-11.6 cm
θ_4	-11.5 cm	90°	0
θ_5	0	0	0

Dado que el producto de matrices no es conmutativo, las transformaciones se han de realizar en el orden indicado. De este modo se tienen que:

$${}^{i-1}_i A = T(z, \theta)T(0, 0, d)T(a, 0, 0)T(x, \alpha) \quad (21)$$

Del producto conmutativo de la ecuación 21) se obtienen las matrices de transformación homogéneas, las cuales se deducen de la siguiente manera para cada una de las articulaciones:

$$\begin{aligned}
 T_0^1(\theta_1) &= \begin{vmatrix} C_1 & 0 & S_1 & 0 \\ S_1 & 0 & -C_1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & -7.5 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} & 22) \\
 T_1^2(\theta_2) &= \begin{vmatrix} C_2 & -S_2 & 0 & -10.3C_2 \\ S_2 & C_2 & 0 & -10.3S_2 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} \\
 T_2^3(\theta_3) &= \begin{vmatrix} C_3 & -S_3 & 0 & -11.6C_3 \\ S_3 & C_3 & 0 & -11.6S_3 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} \\
 T_3^4(\theta_4) &= \begin{vmatrix} C_4 & -S_4 & 0 & -11.5C_4 \\ S_4 & C_4 & 0 & -11.5S_4 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} \\
 T_4^5(\theta_5) &= \begin{vmatrix} C_5 & 0 & S_5 & 0 \\ S_5 & 0 & -C_5 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}
 \end{aligned}$$

Una vez obtenidas las matrices de transformación homogéneas, se realiza el producto conmutativo de las mismas para obtener lo que se considera en (Chacón, et al., 2015) como la matriz del robot de la cual solo nos interesa obtener el vector de posición ya que este describe la localización del efector final del robot, cuyas ecuaciones son descritas a continuación:

$$\begin{aligned}
 p_x &= C_4[11.5C_1S_{23} - 11.5C_{123}] + S_4[11.5C_{13}S_2 + 11.5C_{12}S_3] - 11.6C_{123} & 23) \\
 &\quad + 11.6C_1S_{23} - 10.3C_{12} \\
 p_y &= C_4[11.5S_{123} - 11.5S_1C_{23}] + S_4[11.5S_{12}C_3 + 11.5S_{13}C_2] - 11.6C_{23}S_1 \\
 &\quad + 11.6S_{123} - 10.3C_2S_1 \\
 p_z &= -C_4[11.5S_2C_3 + 11.5C_2S_3] + S_4[11.5S_{23} - 11.5C_{23}] - 11.6C_3S_2 \\
 &\quad - 11.6C_2S_3 - 10.3S_2 - 7.5
 \end{aligned}$$

4.3 Programación en mbed para la cinemática directa

Es necesario implementar a través de la programación de un sistema embebido la solución a la cinemática directa del manipulador. Para poder llevar la cinemática al robot se requieren los siguientes elementos: el robot de 5 grados de libertad, el controlador de los servomotores del robot, el sistema embebido NUCLEO-F446RE, cables para la conexión de los componentes, una fuente regulada a 6 VDC, una computadora, el compilador online mbed, una conexión a internet y la hyperterminal de la computadora.

Para la programación del manipulador se requiere inicialmente conectar la tarjeta Nucleo-F446RE a la tarjeta de control de los servomotores, para establecer una comunicación serial, esta interfaz se presenta en la figura 4.9 (en donde los pines de conexión de la tarjeta Nucleo-F446RE para la interfaz serial corresponden a PC_10 TX y PC_11 RX respectivamente, los cuales se conectan a los pines del controlador TX y RX de manera cruzada), después se conecta la tarjeta Nucleo-F446RE a la computadora.

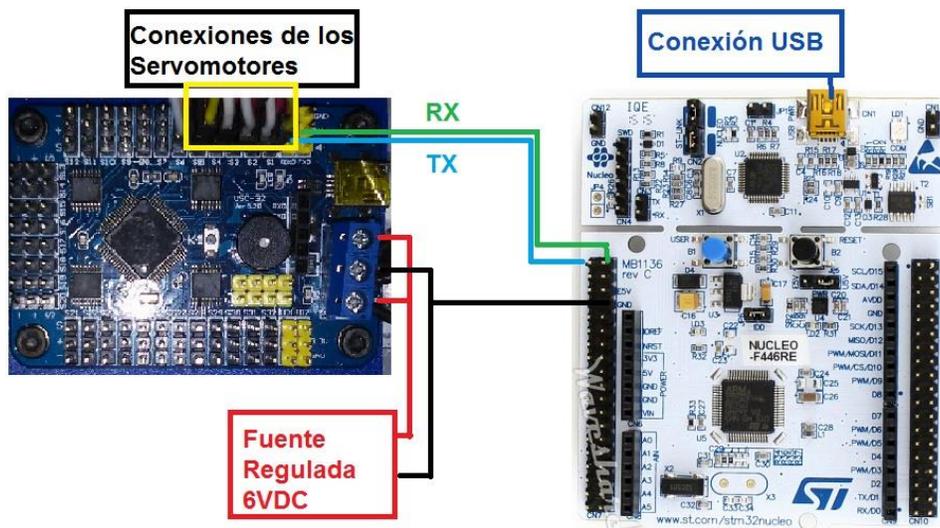


Figura. 4.9 Conexiones necesarias para efectuar la programación del modelo cinemático directo.

Después se ingresa a la cuenta de usuario del compilador mbed por medio de algún navegador y se crea un nuevo programa para la tarjeta NUCLEO-F446RE.

Se configura la comunicación serial con la tarjeta de control de los servomotores, la cual es alimentada con un voltaje de 6VDC como se aprecia en la Figura 4.9, esto debido a que los servomotores requieren de este voltaje para poder operar con su máximo par motriz (Torque).

Posteriormente se hace la calibración de los servomotores descritos en la Tabla 9, donde se aprecia que todos los servomotores son diferentes por lo tanto se manejan diferentes valores de ancho de pulso PWM para alcanzar la posición deseada.

Para calibrar cada uno de los servomotores fue necesario hacerlo de manera experimental, buscando que los servomotores se colocaran en la posición deseada correctamente, en las posiciones de 0°, 90° y 180°. Los resultados obtenidos para cada servomotor se observan en la Tabla 11, donde se presentan los valores de PWM que necesita el controlador para alcanzar la posición deseada.

Tabla 11. Valores en PWM designados al controlador para su posicionamiento.

θ	0° (PWM)	90° (PWM)	180° (PWM)
θ_1	495	1270	2230
θ_2	700	1600	2550
θ_3	480	1555	2480
θ_4	650	1550	2500
θ_5	475	1475	2400
Efactor final	600	1600	2400

Después de obtener los valores de la Tabla 11 se codificó la cinemática directa del manipulador a través de la plataforma de programación online “mbed”. En la programación se emplea la interpolación lineal descrita por la ecuación 24) para los valores descritos anteriormente en la Tabla 11, con la finalidad de obtener la conversión de los PWM a los grados correspondientes para cada servomotor y así obtener un buen posicionamiento.

$$y = \frac{(x - x_1)}{(x_2 - x_1)}(y_2 - y_1) + y_1 \quad 24)$$

Por ejemplo, para encontrar los valores de PWM requeridos para los ángulos que existen entre 0° y 90° para la primera articulación θ_1 , se aplica la interpolación lineal donde: $x = \text{angulo deseado}$, $x_1 = 0^\circ$, $x_2 = 90^\circ$, $y_2 = 1600$ y $y_1 = 650$, y así se obtienen los valores de PWM a grados para cada intervalo.

El código asociado a la cinemática directa se encuentra descrito en el anexo A1 del documento.

Además el usuario podrá apreciar el posicionamiento de la cinemática directa del robot mediante la Hyperterminal de la computadora.

4.4 Instrumentación para la captura de movimiento

Como se describe en este trabajo la teleoperación es una rama de la robótica que necesita de la información proveniente de sensores la cual es utilizada para la manipulación del robot.

El sensor MPU-6050 a pesar de ser empleado en aeronáutica se ha vuelto muy popular para aplicaciones de robótica, diseño de drones, estabilizador de cámaras en movimiento, para controles de navegación, controles de videojuegos, sensor para vestimenta inteligente y juguetes, debido al gran avance tecnológico que estos representan ya que estos sensores antes eran demasiado voluminosos y costosos, por lo que ahora gracias al estudio de los sistemas microelectromecánicos se ha reducido su tamaño y el precio es muy accesible. Los dos sensores MPU6050 son empleados para la teleoperación del manipulador un sensor está ubicado en el guante y el otro en el brazo del operador. La colocación adecuada de dichos sensores permitirá la teleoperación del robot de cinco grados de libertad, cuya programación será explicada en el apartado de Anexo A2. Como lo dice la obra de (Ollero, 2001), la teleoperación necesita de dos elementos claves los cuales son: la tele-actuación y la tele-sensorización en otras palabras, la manipulación de los servomotores del robot mediante las operaciones de alabeo, cabeceo y guiñado que proporcionan los giroscopios.

Para este trabajo se eligió utilizar una galga extensiométrica, dos giroscopios/acelerómetros MPU6050 y un potenciómetro.

4.4.1 Instrumentación de un guante para la captura de movimiento

Desde la creación de los primeros manipuladores el hombre se ha basado en la anatomía humana, es por ello que a los robots también se les denomina brazos manipuladores o brazos robóticos, porque están basados en el brazo humano. Por esta razón en el proyecto, se quiere implementar la teleoperación a un brazo manipulador, las partes que conforman al robot y que se parecen a la mano humana son: la garra, la cuarta articulación y la quinta articulación como se muestra en la figura 4.10.



Figura 4.10 Semejanzas entre la mano humana y el robot, a) garra del robot≈dedos, b) cuarta articulación≈muñeca, c) giro de la mano≈quinta articulación.

Para teleoperar la apertura y cierre de la garra del manipulador se utiliza a la galga extensiométrica ya que gracias a su flexibilidad y variación resistiva. La flexibilidad es útil porque la galga extensiométrica se adaptara al guante en el dedo índice de la mano derecha y por su resistividad porque permite implementarla con un divisor de voltaje, como una señal analógica la cual se leerá en el sistema embebido.

El giroscopio/acelerómetro MPU6050 será incorporado en el guante de tal manera que se pueda teleoperar la primera, cuarta y quinta articulación, esto mediante los movimientos de alabeo, cabeceo y guiñado, ya que el sensor MPU6050 puede captar y registrar estos movimientos. Esta información permite efectuar parte de la teleoperación solo para el guante (ver figura 4.11).



Figura 4.11 Guante instrumentado para la teleoperación del manipulador.

4.4.2 Adaptación del potenciómetro al codo

Inicialmente la idea era utilizar tres giroscopios/acelerómetros MPU6050 uno para la mano otro para el codo y el ultimo para el brazo, pero debido a las características de manipulador en cuanto a las restricciones de sus movimientos se decidió solo implementar un potenciómetro para teleoperar la tercera articulación del manipulador.

Posteriormente, se buscó la manera de adaptar el potenciómetro al codo del brazo derecho mediante el uso de una codera hecha con tela sintética flexible y dos pequeñas barras de aluminio en donde el punto de unión para los extremos de las barras es el movimiento angular del potenciómetro, ya que al girar la perilla del potenciómetro éste modifica su valor resistivo, de tal forma que una barra este unida a la perilla y la otra barra al potenciómetro aprovechando el movimiento angular de tal manera que se adapte al codo (como se aprecia en la figura 4.12).



Figura. 4.12 Potenciómetro instrumentado en el codo para el control del movimiento angular de la tercera articulación del robot.

El valor del potenciómetro es de 10 K Ω , el valor mínimo y máximo empleado para el movimiento angular de la resistencia permite adaptarlo como una señal analógica la cual será leída por el sistema embebido.

4.4.3 Instrumentación del brazo para la captura del movimiento

El segundo giroscopio/acelerómetro MPU6050 está colocado en el brazo del usuario con un soporte hecho de polyester, poliuretano y velcro, donde el sensor deberá estar colocado en la parte superior del bíceps branquial de la mano derecha con la flecha X del sensor apuntando hacia la mano (como se aprecia en la figura 4.13).



Figura 4.13 MPU6050 para la captura de movimiento del brazo colocado en su soporte.

Para hacer uso del segundo sensor se optó por utilizar otro sistema embebido la tarjeta NUCLEO-F411RE debido a que la librería del sensor para el microcontrolador solo permite utilizar un sensor MPU6050, por lo tanto para establecer una comunicación en la teleoperación se crea una interfaz serial con las dos tarjetas NUCLEO para que la tarjeta F411RE envíe la información del segundo sensor MPU6050 a la primera tarjeta F446RE y esta tome el valor que controlará el movimiento angular de la segunda articulación del manipulador.

4.4.1.1 Instrumentación completada para la teleoperación

Una vez adaptados los sensores del guante, el potenciómetro del codo y el segundo sensor MPU6050 en el brazo se conectarán todos los elementos de la instrumentación del brazo para llevar a cabo la programación de la teleoperación, donde la tarjeta NUCLEO-F446RE es el sistema maestro de la teleoperación y la tarjeta NUCLEO-F411RE es el sistema esclavo que envía la información del segundo MPU6050 (ver figura 4.14).

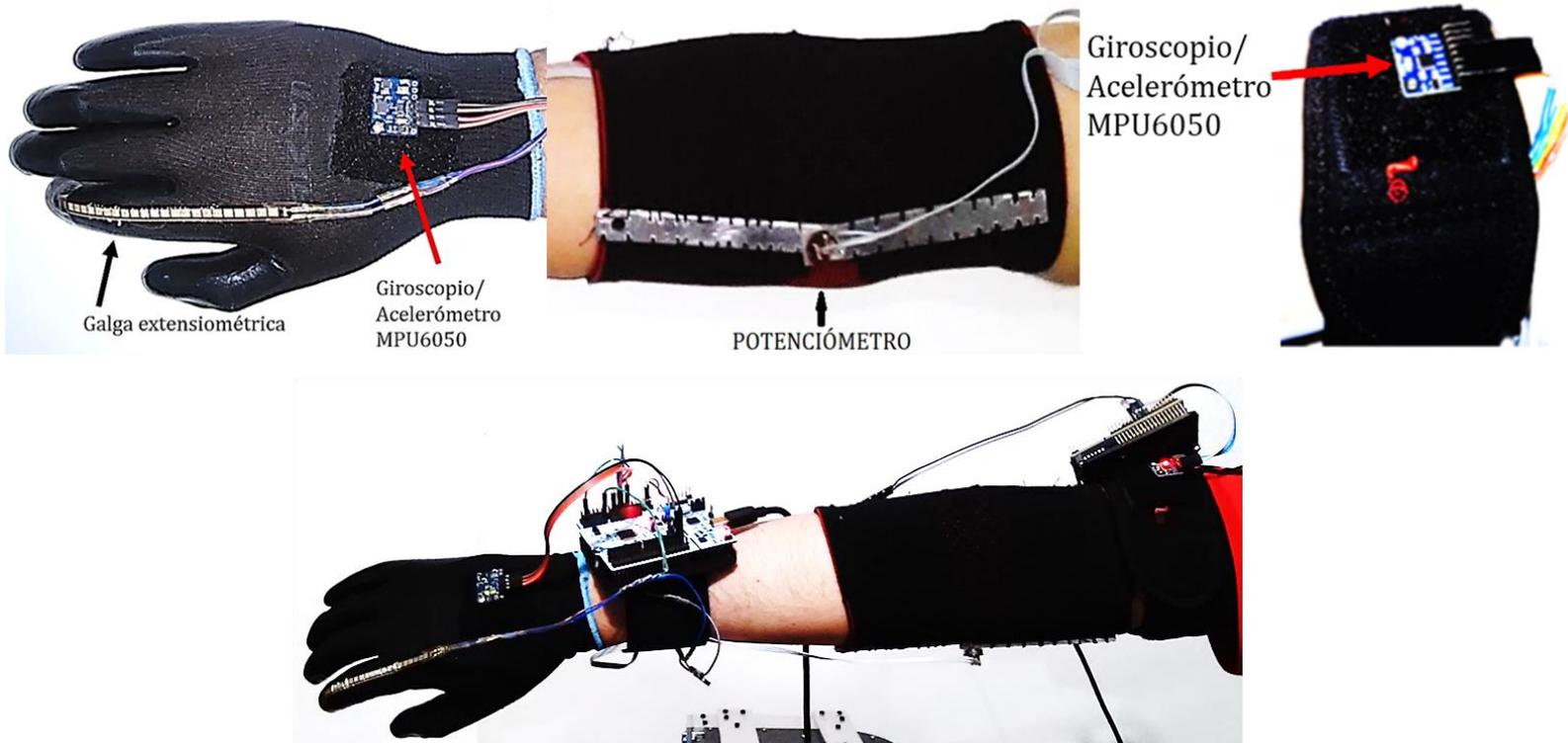


Figura. 4.14 Instrumentación para la captura de movimiento necesaria en la teleoperación.

4.5 Programación de la teleoperación del brazo robótico

En este proyecto se implementó la teleoperación directa es decir que el operador humano representa al sistema maestro y el manipulador de cinco grados de libertad representa al sistema esclavo. De esta forma los movimientos realizados por el brazo humano serán imitados por el brazo robótico con sus correspondientes restricciones ya que la arquitectura del manipulador difiere de la movilidad que se puede efectuar con él.

Para llevar a cabo la programación de la teleoperación del manipulador se requieren los siguientes dispositivos:

- Un brazo robótico de cinco grados de libertad colocado en su soporte para asimilar al brazo humano, con su tarjeta de control, su sistema embebido y su etapa de potencia.
- Tener instrumentado el brazo humano mediante los sensores adecuados para la tele-sensorización en este caso dos MPU-6050, una galga extensiométrica y un potenciómetro.

Una vez que se tienen listos los elementos se procede a realizar las conexiones para contar con el sistema embebido y el brazo humano instrumentado (ver Figura 4.15).

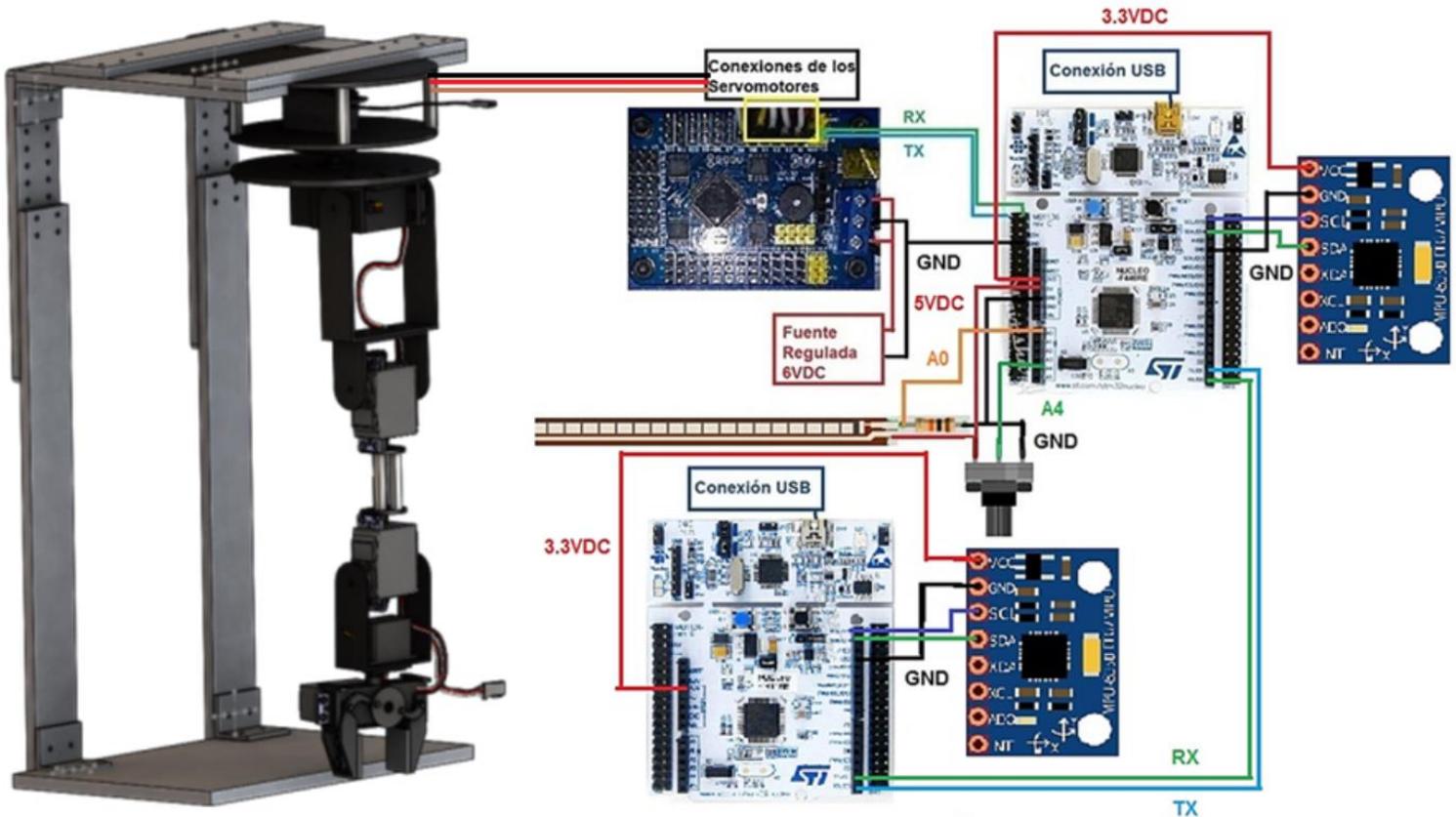


Figura 4.15 Conexiones necesarias para contar con la interfaz entre el brazo y el manipulador para la teleoperación.

Después de realizar las conexiones, se procede a la programación, utilizando el software en línea “mbed” para lo cual se diseñó el siguiente procedimiento:

- Primero se programaron individualmente los dos giroscopios, la galga extensiométrica y el potenciómetro.
- Para la programación de la galga extensiométrica y del potenciómetro, primero se dobla a la galga a 90° para conocer su resistencia máxima y se extiende hasta 0° para conocer su resistencia mínima, en el potenciómetro se dobla el codo (como se muestra en la figura 4.12) también a 90° para conocer su

resistencia en esa posición, y se hace lo mismo para el ángulo de 0° , teniendo conocimiento de la resistencia máxima y mínima se emplea la interpolación lineal para convertir la resistencia eléctrica en grados, con lo cual se tiene el control del efector final con la variación resistiva de la galga y de la tercera articulación del manipulador mediante la variación resistiva del potenciómetro.

- La programación de giroscopio/acelerómetro MPU6050 es más compleja debido a que el sensor utiliza el protocolo de comunicación I2C y también debido a su alta sensibilidad. Para programar el giroscopio se importa la librería del sensor al programa principal y se utilizan las funciones principales de la librería para conocer cómo opera el sensor, donde lo más importante es conocer los datos del movimiento angular en grados de los ejes X, Y y Z del giroscopio, ya que también se implementará la interpolación lineal para convertir los grados obtenidos por el sensor a los anchos de pulso requeridos para manipular al controlador del robot y así poder teleoperar por completo al manipulador de cinco grados de libertad (la programación del sensor MPU6050 se encuentra detallada en el anexo A2).
- Debido a complicaciones con la librería del sensor se decidió utilizar otro sistema embebido (NUCLEO-F411RE) para implementar una interfaz serial con la tarjeta principal y enviarle los datos del segundo giroscopio ubicado en el brazo al primer sistema embebido (la programación del segundo sensor MPU6050 se encuentra detallada en el anexo A2.1).

Las pruebas de la teleoperación se aprecian en la sección de resultados.

Capítulo 5 Resultados

En esta sección se exponen los resultados obtenidos de la experimentación y pruebas realizadas a los elementos que conforman el proyecto de tesis para poder llevar a cabo la teleoperación del manipulador por medio de la instrumentación realizada para el proceso de captura de movimiento.

5.1 Modelo cinemático directo del robot de 5 GDL

Los cálculos necesarios para obtener el modelo cinemático directo del manipulador ya fueron expuestos en el capítulo anterior, la programación se llevó a cabo mediante el software online *mbed*, la cual se describe en el Anexo A2, por lo tanto se explicará brevemente como se ejecuta el programa.

Una vez creado el programa en la plataforma *mbed*, primero se declaran las coordenadas articulares que se utilizan dentro del programa donde: $q_1 = 0$, $q_2 = 90$, $q_3 = 0$, $q_4 = 0$, $q_5 = 0$ (ver anexo A2, *posición deseada*). Se compila el programa y se ejecuta en la tarjeta NUCLEO-F446RE, obteniendo como resultado lo que se aprecia en la figura 5.1. Como se mencionó anteriormente las coordenadas de la posición del efector final del manipulador (p_x , p_y y p_z) se muestran vía comunicación serial a la Hyperterminal de la computadora. Estos resultados coinciden con los estudios realizados por otros autores (Ollero, 2001) y (Reyes, 2011).



Figura 5.1 El efector final del manipulador alcanza la posición calculada por el programa la cual se puede apreciar en la hyperterminal de la computadora.

La programación de la cinemática directa del manipulador sirve para conocer la posición del efector final en la programación de la teleoperación del robot.

5.1.1 Rangos de movilidad y restricciones del manipulador

Como se mencionó anteriormente, el manipulador está conformado por seis servomotores, cinco ubicados como accionamiento directo en las articulaciones del robot y otro para el accionamiento de la pinza del efector final, todos los servomotores tienen un rango de movilidad de 220° pero para alargar la vida útil de los servomotores, se limita a un rango de 180° , debido a que si el servomotor se posiciona en su rango máximo y permanece en dicha posición durante un tiempo mayor a cinco minutos, los engranajes del servomotor pueden sufrir desgaste mecánico quedando el servomotor inservible, por lo tanto, la movilidad de los servomotores es estable en el rango de 0° a 180° como se aprecia en las figuras 5.2 y 5.3.

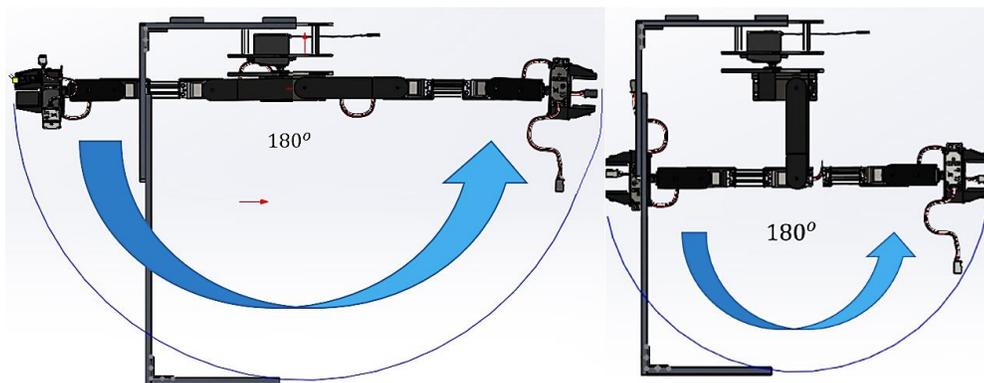


Figura 5.2 Rangos de movimiento para la segunda y tercera articulación del manipulador.

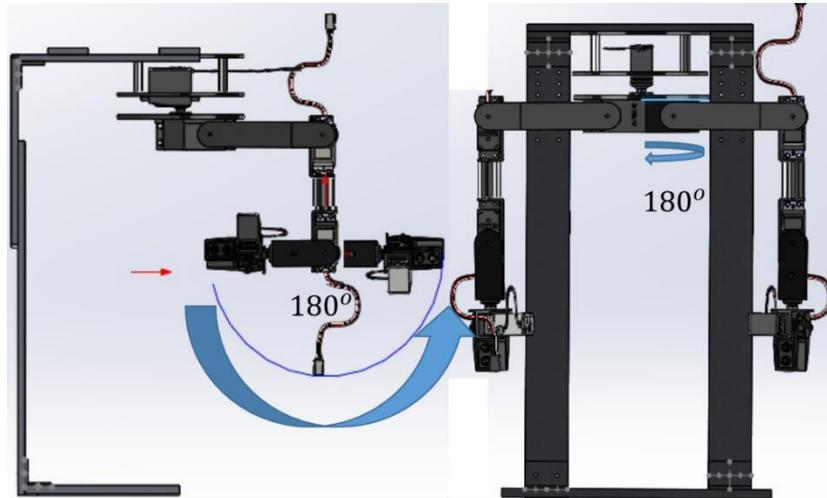


Figura 5.3 Rango de movimiento para la base del robot y su cuarta articulación.

Las restricciones de movimiento entre el manipulador y el brazo humano dependen tanto de las limitaciones de movimiento que tiene el brazo humano así como los pocos grados de libertad que ofrece el manipulador ya que el brazo humano puede efectuar movimientos que el manipulador no puede lograr debido a su arquitectura y viceversa por ejemplo: En la figura 5.4 a) se aprecia el movimiento de abducción y aducción del brazo humano, dichos movimientos solo pueden ser efectuados por el robot en un rango de 0 a 90° tomando como punto de partida el movimiento de aducción. Como se muestra en la figura 5.4 b), solo el movimiento interno que se efectúa con el brazo humano en un rango de 0 a 130° puede ser efectuado por el manipulador; el movimiento que se muestra en la figura 5.4 c) puede ser asimilado por el robot de 0 a 90°, el movimiento interno y externo con el codo flexionado a 90° como se muestra en la figura 5.4 d) se efectúa en su totalidad por el robot.

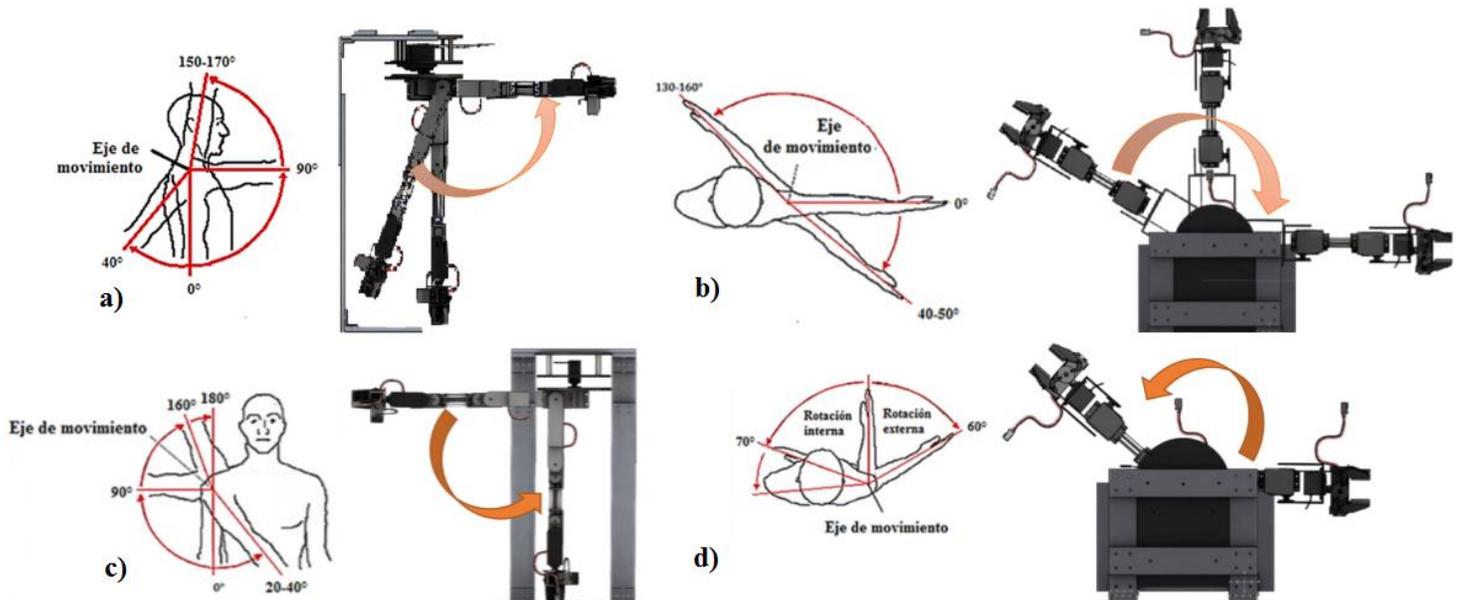


Figura 5.4 Similitudes de movimiento entre el humano y el robot.

En la figura 5.5 a) la limitación del movimiento se debe al límite de grados de libertad del manipulador; para la figura 5.5 b) el movimiento de abducción del brazo a $150-170^\circ$ no puede ser efectuado por el manipulador debido al límite de movimiento del servomotor que corresponde al brazo; en la figura 5.5 c) el movimiento externo del brazo humano que va de 0 a $40-50^\circ$ no puede ser efectuado por el robot debido al rango de movilidad del servomotor de la base es de 0 a 180° .

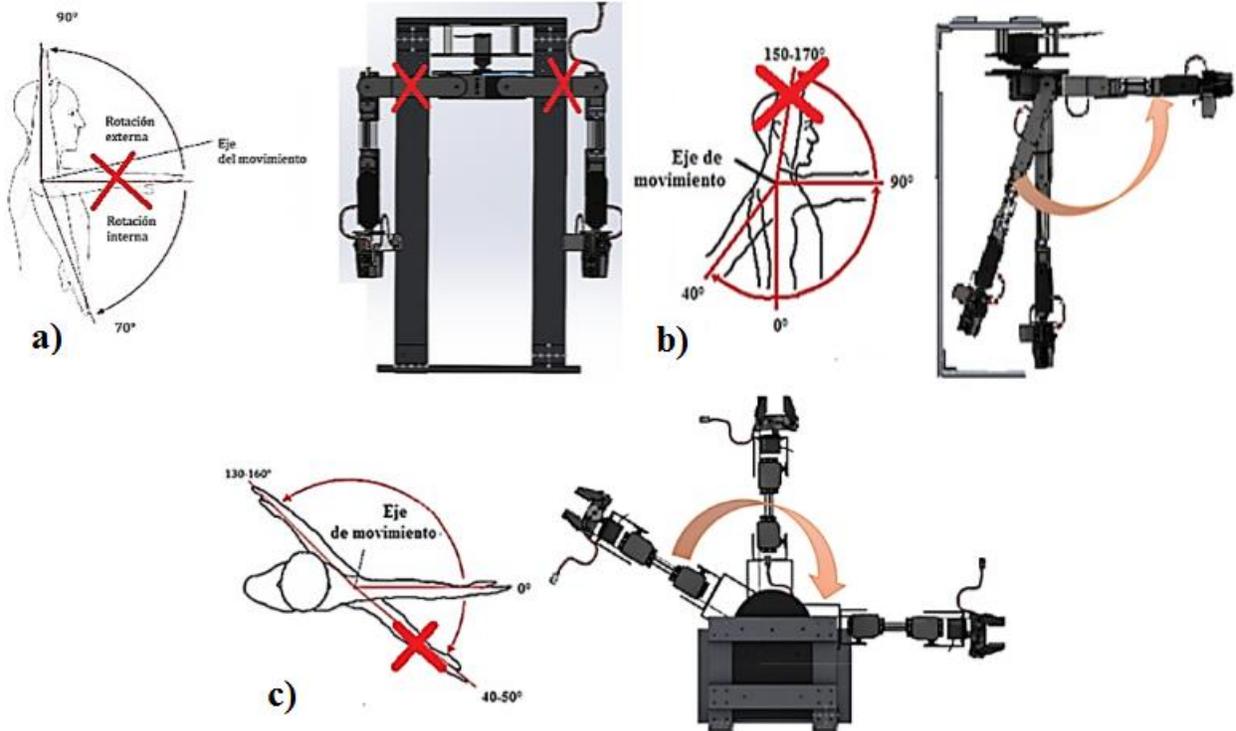


Figura 5.5 Limitaciones de los movimientos del brazo humano con respecto al robot.

5.2 Instrumentación del dispositivo de captura de movimiento para la teleoperación del brazo robótico

La instrumentación del dispositivo de captura de movimiento es vital para aplicar la teleoperación directa al manipulador, debido a que actúa como el sistema maestro y el robot como el sistema esclavo, donde la tele-actuación y la tele-sensorización se encuentran presentes debido al uso de sensores, los cuales permiten la manipulación del robot. A continuación se hablará de las pruebas realizadas para la instrumentación.

5.2.1 Instrumentación del guante

Esta instrumentación permite sensor cuando el usuario cierra la mano, para la instrumentación del guante como se mencionó anteriormente, se utilizó una galga extensiométrica y un giroscopio acelerómetro MPU6050. La galga extensiométrica presenta un valor resistivo máximo de 27.3 K Ω cuando se flexiona a 90° y un mínimo de 13.7 K Ω a 0°, (ver figura 5.6).



Figura 5.6 Valor resistivo máximo y mínimo de la galga extensiométrica medido con un multímetro.

Para el giroscopio/acelerómetro MPU6050, primero se debe conectar el sensor a la tarjeta NUCLEO-F446RE como se especifica en el capítulo anterior. Una vez conectado el sensor, se abre la sesión de programación para mbed, se importa la librería del sensor MPU6050 y se compila el programa de prueba para cargarlo al sistema embebido. El sensor se debe colocar en una superficie plana y nivelada para que el sensor se ubique en el cero absoluto al medir sus movimientos angulares, los cuales son enviados vía serial a la computadora y visualizados en la Hyperterminal a una velocidad de 9600 baudios de lectura (ver figura 5.7).

En la figura 5.7, se puede apreciar un movimiento angular de alabeo de 45° mientras que los movimientos de cabeceo y guiñado siguen en cero con lo que se puede deducir que el sensor presenta una buena calibración para ser utilizado en la teleoperación del manipulador.

Dicha prueba también fue aplicada al otro giroscopio/acelerómetro MPU6050 pero con el uso de la tarjeta NUCLEO-F411RE.

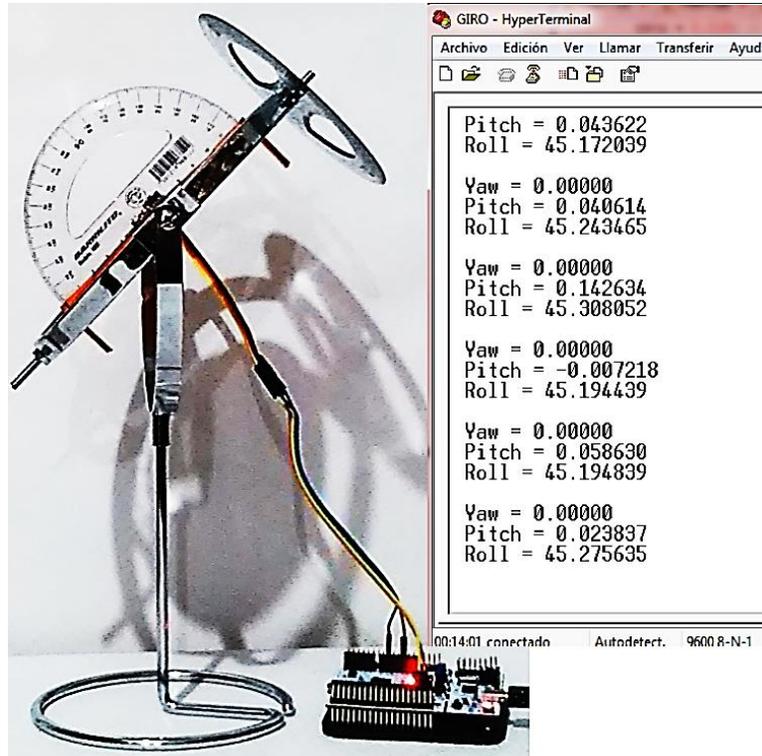


Figura 5.7 Pruebas de movimiento angular al giroscopio/acelerómetro MPU6050.

5.2.2 Instrumentación del codo

Como se mencionó en el capítulo anterior se adaptó un potenciómetro a una codera de tal forma que se aproveche su variación resistiva como se aprecia en la figura 5.8. El valor máximo del potenciómetro colocado a 90° es de $1.6K\Omega$ y colocado a 0° la resistencia es de 0Ω . Dicha resistencia será enviada como una señal analógica a la tarjeta NUCLEO-F446RE ya que el potenciómetro se alimenta con la tarjeta a 5 VCC y a tierra, tomando como señal análoga la variación del voltaje que nos proporciona el potenciómetro.

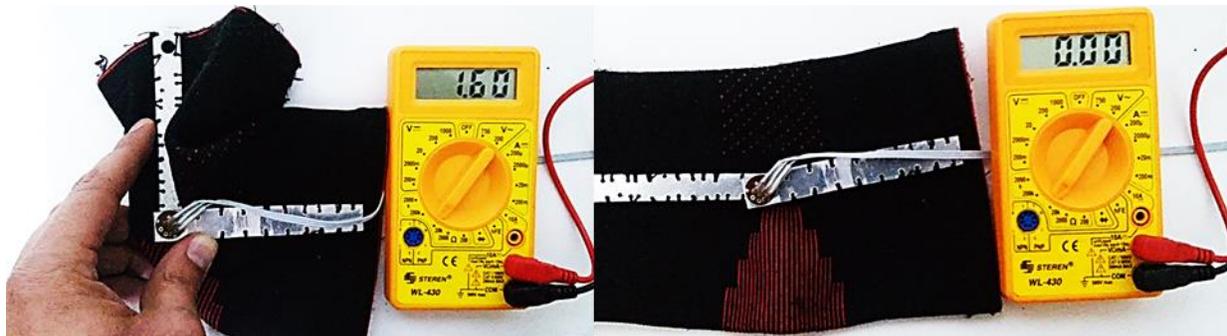


Figura 5.8 Resistencia del potenciómetro a 90° y a 0° .

5.2.3 Instrumentación del brazo

Para tomar las capturas de movimiento del brazo se adaptó al sensor (como se mostró en el capítulo anterior), a diferencia del MPU6050 que se coloca en el guante el cual usa el sistema maestro NUCLEO-F446RE, para el segundo giroscopio se utiliza la tarjeta NUCLEO-F441RE, debido a que la librería del sensor solo permite utilizar un sensor, por consiguiente se debe enviar la información de captura de los movimientos del brazo vía serial a la tarjeta maestra para permitir una comunicación con todos los dispositivos. El programa de la tarjeta NUCLEO-F411RE se encuentra descrito en el anexo A3.1.

En la figura 5.9 se aprecia la instrumentación realizada para la captura de movimiento del brazo humano la cual permitira la teleoperación del manipulador.

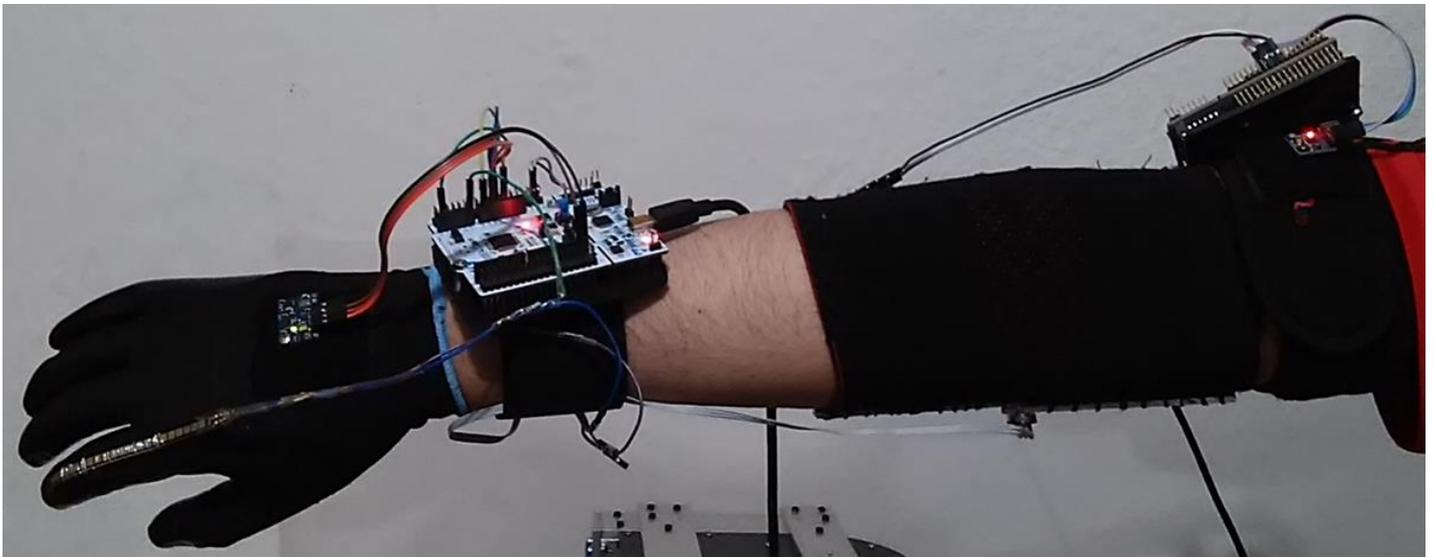


Figura 5.9 Instrumentación para la captura de movimiento , el guante instrumentado con la galga extensiométrica y el sensor MPU6050 y también el brazo instrumentado con el otro sensor MPU6050.

En la figura 5.9 se aprecia que las tarjetas NUCLEO se adaptaron también a la instrumentación, esto debido a que la comunicación I^2C tiene un alcance de 15 cm por lo tanto las tarjetas no pueden ir sujetas al soporte del manipulador, pero la comunicación serial si permite una interfaz alámbrica superior por lo tanto se utiliza una conexión de 2 metros entre el manipulador y la instrumentación.

5.3 Programar la teleoperación al brazo robótico de 5 GDL

El programa de la teleoperación del manipulador se presenta en el anexo A3 y A3.1, por consiguiente se explicara la programación de la teleoperación del manipulador. Cada elemento de la instrumentación como por ejemplo el potenciómetro o la galga, fue separado en funciones para una mejor comprensión del programa.

- a) Para adaptar la galga extensiométrica para el control de movimiento del efector final, se realizan las conexiones al sistema embebido NUCLEO-F446RE (como se describe en el capítulo anterior). El sistema embebido recupera la señal de la galga extensiométrica como una señal analógica por la variación de voltaje, la cual se produce al variar la resistencia de la galga por los movimientos efectuados con el cierre y apertura de la mano. La señal analógica mide 0 cuando la mano está extendida y 1 cuando la mano está cerrada. Dicha variación intermedia de valores como por ejemplo 0.5 es considerada para el programa una apertura de 45 grados para el servomotor por lo cual el efector final quedara abierto al 50 %.
- b) La variación resistiva del potenciómetro es similar a la de la galga extensiométrica, solo que el potenciómetro al ser leído por la tarjeta NUCLEO-F446RE despliega un valor analógico de 100 cuando el codo está extendido y de 650 cuando el codo se encuentra a 90°. Para asemejar el valor analógico del potenciómetro, se toma el valor máximo y el valor mínimo de la lectura y se crea una interpolación lineal con los datos, de tal forma que éstos se conviertan, de datos analógicos a grados y después de grados a valores PWM, los cuales se envían vía serial al controlador de servomotores del robot para que se pueda controlar la tercera articulación la cual corresponde al codo.
- c) En el caso del giroscopio, una vez realizadas las pruebas de captura del movimiento angular para los ejes x, y y z, se toma captura de los ángulos que lee el giroscopio, en este caso para controlar la primera, cuarta y quinta articulación, el movimiento de alabeo controlara la quinta articulación, el movimiento de cabeceo controlara la cuarta articulación y el movimiento de guiñada corresponde a la primera articulación. Los grados que proporciona el giroscopio van en un rango de 90° a 0° y terminan en -90°, por lo tanto se adaptaron los valores del giroscopio para que queden de 0° a 180° y así poder aplicar la interpolación lineal a cada movimiento declarando 3 funciones en el programa para cada articulación controlada.
- d) En el caso de la segunda articulación, se emplea la lectura del movimiento de cabeceo del segundo giroscopio con la tarjeta NUCLEO-F411RE, el cual proporciona una lectura que va de 0° a 90°. Cuando el brazo instrumentado se encuentra apuntando hacia abajo el sensor marca 90° y si abducimos el brazo el sensor mide 0°, esta información es enviada vía serial a la tarjeta maestra NUCLEO-

F446RE con un retraso de 250 ms, los grados recibidos son convertidos en una nueva función de interpolación a los PWM correspondientes para el control de la segunda articulación.

- e) Los grados obtenidos por la captura del movimiento son empleados para aplicarlos a las ecuaciones de posición de la cinemática directa del manipulador y posteriormente expuestos al usuario por medio de la Hyperterminal de la computadora.

En la figura 5.10 se aprecia el movimiento que se efectúa aplicando la teleoperación a la muñeca de manipulador con el guante instrumentado.



Figura 5.10 Resultados obtenidos de la teleoperación de la muñeca mediante la instrumentación de la mano con una galga extensiométrica y un giroscopio MPU6050.

En la figura 5.11, se muestra la teleoperación del manipulador de cinco grados de libertad mediante la instrumentación por captura de movimiento, en la cual se aprecia la similitud del movimiento efectuado con el brazo humano y el manipulador, posteriormente se puede visualizar la posición del efector final mediante la Hyperterminal de la computadora.

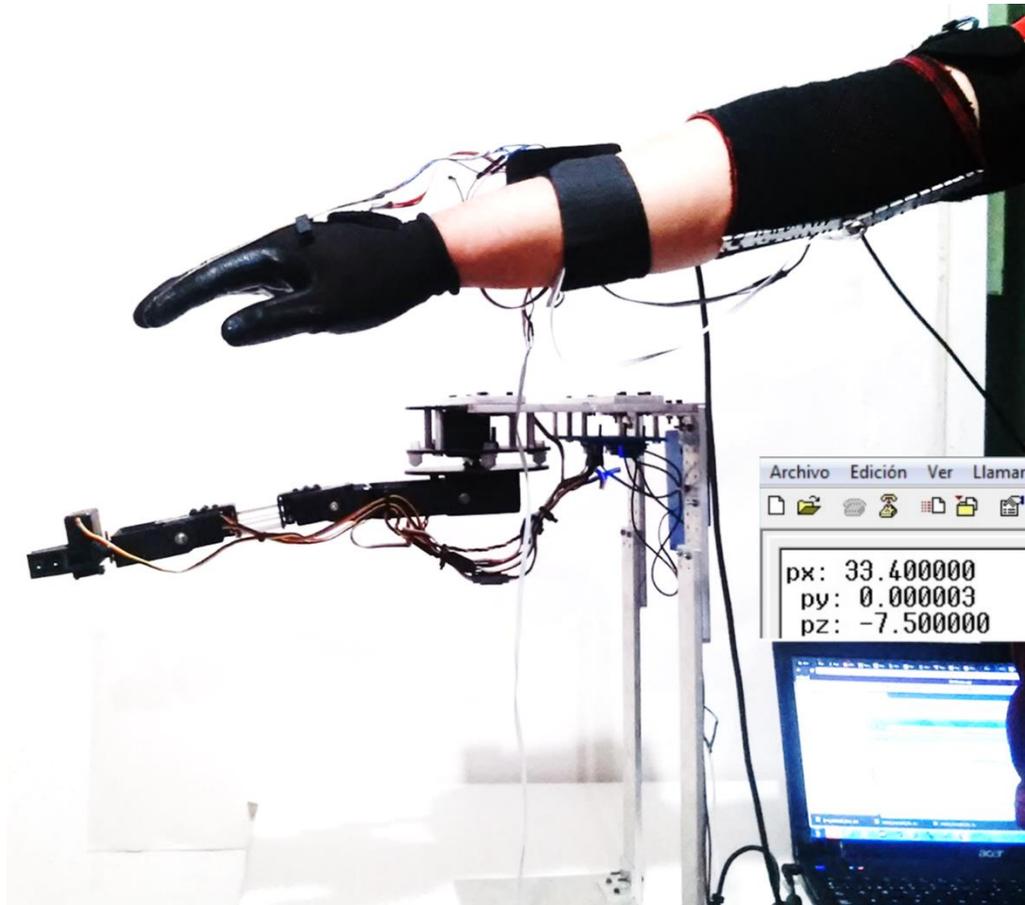


Figura 5.11 Teleoperación del manipulador de 5 GDL mediante la instrumentación por captura de movimiento.

5.3.1 Análisis del retardo en la teleoperación

Durante las pruebas de la teleoperación del manipulador, se observó que la teleoperación tiene un margen aproximado de error de 1.8 segundos de respuesta del sistema embebido al manipulador, el cual fue analizado insertando un temporizador dentro del código del programa de la teleoperación.

En la teleoperación del manipulador, los retrasos de respuesta del sistema son provocados por la secuencia de datos y las operaciones que el microcontrolador debe efectuar, pero principalmente se debe, al tiempo necesario para enviar los datos del segundo sistema embebido NUCLEO-F411RE (que envía la información del segundo sensor giroscopio MPU6050) vía serial a la tarjeta NUCLEO-446RE, ya que este proceso tiene una duración aproximada de 0.6 segundos. Además, el envío de los datos vía serial de la tarjeta NUCLEO-F446RE a la tarjeta del controlador de los

servomotores tiene un retraso aproximado de 0.4 segundos el cual también fue medido mediante un temporizador insertado en el código de la teleoperación.

El sensor MPU6050 también provoca retardos en la respuesta ya que tiene un retraso de lectura aproximado de 0.2 segundos. La sensibilidad del sensor es muy susceptible a las vibraciones y a los cambios bruscos del movimiento efectuados con el brazo humano, ya que provocan un error en la medición, lo que provoca que el sensor realice nuevamente la operación del movimiento angular hasta se descarta el error y se da como valido el movimiento.

En la tabla 12 se aprecia el análisis de los retardos para cada elemento que conforma la teleoperación.

Tabla 12. Análisis de retraso en la teleoperación.

Componente	Retardo (segundos)
Interfaz serial entre NUCLEO-F446RE y NUCLEO-F411RE	≈ 0.6
Interfaz entre NUCLEO-F446RE y la tarjeta de control de los servomotores	≈ 0.4
Lectura del sensor MPU6050 por medio sistema embebido	≈ 0.2
Lectura del potenciómetro por medio sistema embebido	≈ 0.05
Lectura de la galga extensiométrica por medio sistema embebido	≈ 0.1
Interfaz entre el robot y la tarjeta de control de los servomotores	≈ 0.4
Procesamiento de las operaciones matemáticas	≈ 0.04
Teleoperación del manipulador	≈ 1.85

En la figura 5.12 se muestra un ejemplo del retraso en la respuesta del manipulador durante su teleoperación.



Figura 5.12 Retraso en la teleoperación del robot, para esta prueba el retraso fue de 1.8 segundos.

La teleoperación es una rama de la robótica que durante un tiempo fue abandonada por los investigadores tal vez porque no se contaba con la tecnología actual para promover esta ciencia. Con este proyecto se retoma el tema de la teleoperación para examinar y descubrir mediante el uso de la instrumentación, los sistemas embebidos y la robótica, como la fusión del conocimiento crea un área con mucho futuro.

Capítulo 6 Conclusiones

- Se implementó la cinemática directa al brazo robótico de cinco grados de libertad mediante el algoritmo de Denavit-Hartenberg (Reyes, 2011), (Barrientos, 2007) obteniendo como resultado de posicionamiento del efector final.
- Se diseñó y construyó un soporte de aluminio para el robot manipulador de tal manera que se asemeje al brazo humano.
- Se diseñó mediante el diseño asistido por computadora al robot con su soporte.
- Se analizaron los rangos de movimiento del manipulador y sus limitaciones.
- Se realizó la instrumentación por captura de movimiento del brazo humano logrando incorporar dos sensores MPU6050, una galga extensiométrica y un potenciómetro (Pallás, 2005).
- Se realizó la programación de la teleoperación del brazo robótico de cinco grados de libertad.
- Se analizó el retraso en la respuesta de la teleoperación.

6.1 Trabajos a futuro

- La teleoperación se realizó de manera alámbrica se propone implementar un medio de comunicación inalámbrico por ejemplo: Wifi o Bluetooth.
- Se propone emplear otro sensor giroscopio que permita una comunicación múltiple con el sistema embebido.
- Se propone construir un robot antropomórfico que asimile en su totalidad al brazo humano para implementar su teleoperación.

Referencias bibliográficas

- ARM mbed Co. (2016). mbed developer, Recuperado el día 28 de Marzo del 2016 de: <https://developer.mbed.org/compiler/#nav:/;>
- ARM mbed Co a. (2016). mbed developer, Recuperado el día 28 de Marzo del 2016 de: [https://developer.mbed.org/users/kochansky/code/Maestro/.](https://developer.mbed.org/users/kochansky/code/Maestro/)
- ARM mbed Co b. (2016). NUCLEO-F446RE, Recuperado el día 28 de Marzo del 2016 de: [https://developer.mbed.org/platforms/ST-Nucleo-F446RE/.](https://developer.mbed.org/platforms/ST-Nucleo-F446RE/)
- ARM mbed Co c. (2016). NUCLEO-F446RE, Recuperado el día 28 de Julio del 2016 de: <https://developer.mbed.org/platforms/ST-Nucleo-F411RE/>
- Barrientos, A.; Peñin, L, Balaguer, C. y Aracil, C. (2007). Fundamentos de Robótica (2a Ed.) España, Madrid, McGraw-Hill Editor
- Beeby, S., Ensell, G., and Kraft, M., and White, N., 2004, MEMS Mechanical Sensors,(Artech House Inc., New York), p. 173.
- Bejczy, A. y Salisbury, M. (1983). Controlling remote manipulators through kinesthetic coupling. *Comput. Mech. Enginner.* 1983(2) 48-60.
- Benitez, A., Bravo, P., Azgad, C., de la Calleja, J., Muñiz, C. y Sánchez, L. (2014). Modelo cinemático directo e inverso para un manipulador de 5GL. *Visión Politécnica.* 9(2), 17-21.
- Cerón, A (2005). Sistemas robóticos teleoperados, *Ciencia e Ingeniería Neogranadina* 15(2005), 62-72.
- Chacón, M.; Sandoval, R. y Vega, J. (2015). Percepción visual aplicada a la robótica (1a Ed.). México, D.F.; Alfaomega Grupo Editor, S.A. de C.V.

- Chaehoi, S. (2005). Design and Modeling of MEMS Monolithic CMOS in Technology FSBM: Application to the Accelerometers. Tesis de doctorado. Universidad de Montpellier.
- Craig, J. (2006) Robótica (1a Ed.). Addison-Wesley Publishing Company.
- Carrasquilla, A. (2012). Teleoperación de un vehículo remoto en un medio de acceso inalámbrico mediante el uso de una interfaz háptica. *Tecnología en Marcha*. 25(5). 5-13.
- Corke, P. (2011). Robotics, Vision and Control Fundamental Algorithms in MATLAB® (1ª Ed.). Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2011.
- Denavit, J., y Hartenberg, R. (1955). A kinematic notation for lower pair mechanisms based on matrices. *Journal of Applied Mechanics*, 1955(77), 215-221.
- Devoe, D. L y Pisano, A. P. (2001) Surface Micromachined Piezoelectric Acelerometers (PIXLs). *Journal of Microelectromechanical Systems* 10 (2), 180-186.
- Escolano, C. y Minguez, J (2011) Sistema de Teleoperación Multi-robot basado en Interfaz Cerebro-Computador. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial*, 8(2). 16-23.
- Galeano, G. (2014), Programación de sistemas embebidos en C, teoría y practicas aplicadas a cualquier microcontrolador. (1a Ed.). México, D.F.; Alfaomega Grupo Editor, S.A. de C.V.
- Gómez, J. y Ollero, A. (2006), Teleoperación y Telerrobótica, (1a Ed.). México, D.F.; Pearson Educación.
- Hannaford, B. (1989). A design framework for teleoperators with kinesthetic feedback. *IEEE Trans. On Robotics and Automation*. 5(4). 426-434.
- Herrera, A., Cortés, Á., y Aguilera, L. (2008). Los microacelerómetros en la actualidad. *Acta Universitaria* 18(2). 24-32.
- Hirzinger, G. y otros. (1992). The sensory and telerobotic aspects of the space robot technology experiment ROTEX, DLR Report.
- Invensense Inc. (2016). MPU-6050, Recuperado el día 09 de Junio del 2016 de: <http://43zrtwysvxb2gf29r5o0athu.wpengine.netdna-cdn.com/wp-content/uploads/2015/02/MPU-6000-Datasheet1.pdf>.
- Jimenez, R., Pineda, C. y Pinzón, J. (2013). Diseño de un guante háptico de control para manipulador robótico teleoperado. *Ingenium*, 7(17), 19-28.
- Kanda, Y. (1991) Piezoresistance effect in silicon. *Sensors and Actuators A*, 1991(28), 83-91.

- Kraft, M. (2000). Micromachined Inertial Sensors: The State of the Art and a Look into Future. *IMC Measurement and Control* 33 (6), 164-168.
- Kuisma, H (2001). Inertial Sensors for Automotive Applications, Technical Digest 11th Int. Conf. Solid-State Sensors and Actuators (Transducers '01), 430-433.
- Leaño, A., Nunia, A., Pedre, S. y Rovere, L. (2014). Diseño de un telemanipulador háptico para un robot industrial. *IEEE Biennial Congress of Argentina*. 5(14), 491-496.
- Marcano, C. (2008). Interfaces para Aplicaciones de Telerrobóticas y de Teleoperación, "Disertación doctoral no publicada", Universidad de Málaga, Málaga, España.
- Marek, J. (1999). Microsystems for Automotive Applications. *Proceedings 13th European Conference Solid-State Transducers (EuroSensors XIII)*, 1-8.
- Ollero, A. (2001). *Robótica Manipuladores y robots móviles* (1a Ed.). Barcelona, España, Marcombo S.A.
- Pallás, R. (2005) *Sensores y acondicionadores de señal* (4ª Ed.). España, Barcelona, Marcombo-Alfaomega S.A Editores.
- Reyes, F. (2011) *Robótica. Control de robots manipuladores* (1a Ed.). México, D.F.; Alfaomega Grupo Editor, S.A. de C.V.
- Sheridan, T. 1989. Telerobotics. *Automatica*. 25(4). 487-506.
- Schünke, M.; Schulte, E.; Schumacher, U. (2015). Colección Prometheus. Texto y Atlas de Anatomía, Tomo I, Anatomía general y aparato locomotor (3a Ed.). Editorial Médica Panamericana.
- Spectrasymbol. (2016). Flexsensor, Recuperado el día 10 de Junio del 2016 de: <http://www.spectrasymbol.com/wpcontent/themes/spectra/images/datasheets/FlexSensor.pdf>
- Villa-Medina, F., Gutierrez , J y Porta-Gándara, M (2009). Vehículo robótico: autónomo y teleoperado con una PDA, *Ingeniería mecánica, tecnología y desarrollo*. 3(2).
- Vertut, J. y Coiffet, P. (1985) *Teleoperations and Robotics*, Vol 1 y 2. Kogan Page, Prentice Hall.
- Whitney, D. (1985). Historical perspective and state of the art in robot force control, *Proc. IEEE Conference on Robotics and Automation*. 262-268.
- Yazdi, N., Ayazi, F. y Najafi , K. (1998). Micromachined Inertial Sensors. *Proceedings of the IEEE*, 86 (8), 1640-1659.

Youcef-Toumi, K. (1989). Design and Control of Direct-Drive Robots. The MIT Press
1989 (1), 283-302

Anexos

A1 Algoritmo de Denavit-Hartenberg para la obtención del modelo cinemático directo

D-H 1. Numerar los eslabones comenzando con 1 (primer eslabón móvil de la cadena) y acabando con n (último eslabón móvil). Se numerara como eslabón 0 a la base fija del robot.

D-H 2. Numerar cada articulación comenzando por 1 (la correspondiente al primer grado de libertad) y acabando en n.

D-H 3. Localizar el eje de cada articulación. Si esta es rotativa, el eje será su propio eje de giro. Si es prismática, será el eje a lo largo del cual se produce el desplazamiento.

D-H 4. Para i de 0 a n-1 situar el eje z_i sobre el eje de la articulación i+1.

D-H 5. Situar el origen del sistema de la base $\{S_0\}$ en cualquier punto del eje z_0 . Los ejes x_0 y y_0 se situarán de modo que formen un sistema dextrógiro con z_0 .

D-H 6. Para i de 1 a n-1, situar el sistema $\{S_i\}$ (solidario al eslabón i) en la intersección del eje z_i con la línea normal común a z_{i-1} y z_i . Si ambos ejes se cortasen se situaría $\{S_i\}$ en el punto de corte. Si fuesen paralelos $\{S_i\}$ se situaría en la articulación i+1.

D-H 7. Situar x_i en la línea normal común a z_{i-1} y z_i .

D-H 8. Situar y_i de modo que forme un sistema dextrógiro con x_i y z_i .

D-H 9. Situar el sistema $\{S_n\}$ en el extremo del robot de modo que z_n coincida con la dirección de z_{n-1} y x_n sea normal a z_{n-1} y z_n .

D-H 10. Obtener θ_i como el ángulo que hay que girar en torno a z_{i-1} para que x_{i-1} y x_i queden paralelos.

D-H 11. Obtener d_i como la distancia, medida a lo largo de z_{i-1} , que habría que desplazar $\{S_{i-1}\}$ para que x_i y x_{i-1} quedasen alineados.

D-H 12. Obtener a_i como la distancia medida a lo largo de x_i (que ahora coincidiría con x_{i-1}) habría que desplazar el nuevo $\{S_{i-1}\}$ para que su origen coincidiese con $\{S_i\}$.

D-H 13. Obtener α_i como el ángulo que habría de girar en torno a x_i (que ahora coincidiría con x_{i-1}), para que el nuevo $\{S_{i-1}\}$ coincidiese totalmente con $\{S_i\}$.

DH 14. Obtener las matrices de transformación ${}^{i-1}A_i$ definidas en 7).

DH 15. Obtener la matriz de transformación que relaciona el sistema de la base con el del extremo del robot $T = {}^0A_1{}^1A_2\dots{}^{n-1}A_n$

DH 16. La matriz T define la orientación (submatriz de rotación) y posición (submatriz de traslación) del extremo referido a la base en función de las n coordenadas articulares.

A2 Programa en “mbed” de la cinemática directa del manipulador.

```
#include "mbed.h"
Serial pc(USBTX, USBRX); //Interfaz entre la computadora y la tarjeta
Serial device(PC_10, PC_11); //Interfaz entre NUCLEO-F446RE y el controlador
int a[]={6, 5, 4, 3, 2, 1}; //Se declaran los canales para el controlador
const int numdatos=3; //Numero de datos para el interpolador lineal
const int numservo=sizeof(a)/sizeof(int);
int datos[numservo+1] [numdatos]={ //Tabla de datos de los PWM que corresponden
    {495, 1270, 2230}, // a los grados de 0°, 90° y 180°
    {700, 1600, 2550},
    {480, 1555, 2480},
    {650, 1550, 2500},
    {475, 1475, 2400},
    {600, 1600, 2400},
    {0, 90, 180}};
int grados[numservo+1]={0, 45, 45, 45, 0, 90, 1000 }; // Posición deseada
int pasos[numservo+1]={0, 0, 0, 0, 0, 0, 1000}; //Posición inicial
float qq1, qq2, qq3, qq4, qq5; //Variables para radianes
```

```

double px, py, pz; // Posición del efector final
float PI=3.141592654; // Valor de PI
int main() {

qq1=(((grados[0]-
90)+180)*PI)/180); qq2=((grados[1]*PI)/180); // Conversión de radianes
qq3=(((grados[2]-90)*PI)/180); qq4=(((grados[3]-90)*PI)/180); // a grados
qq5=((grados[4]*PI)/180);

    for (int i=0; i<numservo; i++){ //Ciclo anidado para la interpolación
n                                     lineal
    if(grados[i]<datos[numservo][0]){ // de la tabla de datos de los valores
        grados[i]=datos[numservo][0]; // correspondientes a la conversión de
    }                                     // grados a PWM.
                                        if(grados[i]>datos[numservo][numdatos-1]){
                                            grados[i]=datos[numservo][numdatos-1];
                                        }
        for (int j=0; j<numdatos-1; j++){
            if (grados[i]>=datos[numservo][j]&&grados[i]<=datos[numservo][j+1]){
                pasos[i]=(((datos[i][j+1]-datos[i][j])*(grados[i]-datos[numservo][j])
                    ))/(datos[numservo][j+1]-datos[numservo][j])+datos[i][j];
            }
        }
    }

for( int i=0; i<numservo; i++){ //Asignación del numero de servomotor
    device.printf("#%dP%d",a[i],pasos[i]); //y el valor PWM que corresponde
    pc.printf("#%dP%d",a[i],pasos[i]); //a su valor en grados asignados al
    }                                     // controlador del robot

device.printf("T%d\r\n",pasos[numservo]);
px=(cos((double)qq4)*((11.5*cos((double)qq1)*sin((double)qq2)*sin((double)qq3))
-(11.5*cos((double)qq1)*cos((double)qq2)*cos((double)qq3))))+(sin((double)qq4)
*((11.5*cos((double)qq1)*sin((double)qq2)*cos((double)qq3))+(11.5*cos((
(double)qq1)*cos((double)qq2)*sin((double)qq3))))-
(11.6*cos((double)qq1)*cos((double)qq2)*cos((double)qq3))+(11.6*cos((double)qq1)
)*sin((double)qq2)*sin((double)qq3))-(10.3*cos((double)qq1)*cos((double)qq2));
py=(cos((double)qq4)*((11.5*sin((double)qq1)*sin((double)qq2)*sin((double)qq3))
-(11.5*sin((double)qq1)*cos((double)qq2)*cos((double)qq3))))+(sin((double)qq4)
*((11.5*sin((double)qq1)*sin((double)qq2)*cos((double)qq3))+(11.5*sin((
(double)qq1)*cos((double)qq2)*sin((double)qq3))))-
(11.6*sin((double)qq1)*cos((double)qq2)*cos((double)qq3))+(11.6*sin((double)qq1)
)*sin((double)qq2)*sin((double)qq3))-(10.3*sin((double)qq1)*cos((double)qq2));
pz=(-
cos((double)qq4)*((11.5*sin((double)qq2)*cos((double)qq3))+(11.5*cos((double)qq
2)*sin((double)qq3))))+(sin((double)qq4)*((11.5*sin((double)qq2)*sin((double)qq
3))-(11.5*cos((double)qq2)*cos((double)qq3))))-
(11.6*sin((double)qq2)*cos((double)qq3))-
(11.6*cos((double)qq2)*sin((double)qq3))-(10.3*sin((double)qq2))-7.5;
// Ecuaciones de la Cinemática Directa aplicando el algoritmo de D-H
pc.printf("px: %f \n\r py: %f \n\r pz: %f\r\n",px,py,pz); //Impresión de la
// posición del efector final en la Hyperterminal
while(1)
{
}
}

```

A3. Programa de la teleoperación del manipulador

```
#include "mbed.h"
#include "MPU6050.h"
float sum = 0, meas=0.0, meas2=0.0;
uint32_t sumCount = 0;
MPU6050 mpu6050;
Timer t;
AnalogIn analog_value(A0); //GALGA EXTENSIOMÉTRICA
AnalogIn analog(A4); //POTENCIOMETRO
Serial pc(USBTX, USBRX); // tx, rx
Serial device(PC_10, PC_11); //CONTROLADOR DE SERVOS
Serial uart(PC_12, PD_2); //INTERFAZ PARA EL SEGUNDO GIROSCOPIO

double conv, grado5, qq1, grado4, qq2, grado3, qq3, grado2, qq4;

void servo1(){ //5 SERVOMOTOR MANO
    int grado1=90-roll;
    if(grado1>91)
    {
        p1= (((1000)*(grado1))/(90))+475;
    }
    else if(grado1<=181)
    {
        p1= (((2400-1475)*(grado1-90))/(90))+1475;
    }
}

void servo2(){ //4 SERVOMOTOR MUÑECA
    int grado2=90-pitch;
    if(grado2>91)
    {
        p2= (((1550-650)*(grado2))/(90))+650;
    }
    else if(grado2<=181)
    {
        p2= (((2500-1550)*(grado2-90))/(90))+1550;
    }
}

void servo3(){ // 3 SERVOMOTOR CODO
    meas2 = analog.read();
    meas2 = meas2 * 180;
    int grado3=90-meas2;
    if(grado3>91)
    {
        p3= (((1550-650)*(grado3))/(90))+650;
    }
    else if(grado3<=181)
    {
        p3= (((2500-1550)*(grado3-90))/(90))+1550;
    }
}

void servo4(){ // 2 SERVOMOTOR BRAZO
    int grado4=90-mes;
    if(grado4>91)
    {
        p4= (((1550-650)*(grado4))/(90))+650;
    }
}
```

```

        else if (grado4 <= 181)
        {
            p4 = (((2500-1550) * (grado4-90)) / (90)) + 1550;
        }
    }
}

void servo5() { // 1 SERVOMOTOR BASE
    int grado5 = 90 - yaw;
    if (grado5 > 91)
    {
        p5 = (((1290-495) * (grado5)) / (90)) + 495;
    }
    else if (grado5 <= 181)
    {
        p5 = (((2230-1290) * (grado5-90)) / (90)) + 1290;
    }
}

void servo6() { // EFECTOR FINAL
    meas = analog_value.read();
    meas = meas * 180;

    int grado6 = 90 - meas;
    if (grado6 > 91)
    {
        p6 = (((1550-650) * (grado6)) / (90)) + 650;
    }
    else if (grado6 <= 181)
    {
        p6 = (((2500-1550) * (grado-90)) / (90)) + 1550;
    }
}

int main()
{
    int s1=2, s2=3, s3=4, s4=5, s5=6, s6=1; // ASIGNACIÓN DE LOS SERVOMOTORES
    int p1=0, p2=0, p3=0, p4=0, p5=0, p6=0;
    int v=500; // VELOCIDAD DE OPERACIÓN DEL ROBOT
    pc.baud(9600);
    // Inicializar I2C
    i2c.frequency(400000); // Frecuencia (400 kHz) I2C
    t.start();

    // INICIALIZACIÓN Y CHEQUEO DEL SENSOR
    uint8_t whoami = mpu6050.readByte(MPU6050_ADDRESS, WHO_AM_I_MPU6050);
    // LECTURA DE LOS REGISTROS DEL SENSOR MPU-6050
    pc.printf("I AM 0x%x\n\r", whoami); pc.printf("ACTIVO 0x68\n\r");
    if (whoami == 0x68) // SENSOR ACTIVO
    {
        pc.printf("MPU6050 EN LINEA...");
        mpu6050.MPU6050SelfTest(SelfTest); // INICIALIZACIÓN AUTOEXAMINACIÓN Y VALORE
S
DE FABRICA
        pc.printf("x-axis self test: acceleration trim within : ");
        pc.printf("%f", SelfTest[0]); pc.printf("% of factory value \n\r");
        pc.printf("y-axis self test: acceleration trim within : ");
        pc.printf("%f", SelfTest[1]); pc.printf("% of factory value \n\r");
        pc.printf("z-axis self test: acceleration trim within : ");
        pc.printf("%f", SelfTest[2]); pc.printf("% of factory value \n\r");
    }
}

```

```

pc.printf("x-axis self test: gyration trim within : ");
pc.printf("%f", SelfTest[3]); pc.printf("% of factory value \n\r");
pc.printf("y-axis self test: gyration trim within : ");
pc.printf("%f", SelfTest[4]); pc.printf("% of factory value \n\r");
pc.printf("z-axis self test: gyration trim within : ");
pc.printf("%f", SelfTest[5]); pc.printf("% of factory value \n\r");

if(SelfTest[0] < 1.0f && SelfTest[1] < 1.0f && SelfTest[2] < 1.0f &&
SelfTest[3] < 1.0f && SelfTest[4] < 1.0f && SelfTest[5] < 1.0f)
{
mpu6050.resetMPU6050(); // RESETEO DE LOS REGISTROS INICIA LA CALIBRACIÓN
mpu6050.calibrateMPU6050(gyroBias, accelBias); // CALIBRACIÓN COMPLETADA
mpu6050.initMPU6050(); pc.printf("MPU6050 LISTO...\n\r");
// LECTURA DE LOS DATOS ENTREGADOS POR EL SENSOR
}
else
{
pc.printf("EL SENSOR NO PASA LA EXAMINACIÓN\n\r");
}
else
{
pc.printf("CONECTE EL SENSOR POR FAVOR: \n\r");
pc.printf("%#x \n", whoami);
while(1) ; // CICLO INFINITO DECLARADO POR SI LA COMUNICACIÓN NO SE HA
// DETECTADO
}

while(1) {

// LOS REGISTROS DEL SENSOR ADQUIEREN NUEVOS DATOS
if(mpu6050.readByte(MPU6050_ADDRESS, INT_STATUS) & 0x01) { // CHECA LOS DATO
S
mpu6050.readAccelData(accelCount); // LEE LOS VALORES X, Y Y Z DEL
// ACELEROMETRO

mpu6050.getAres();

// CALCULO DEL VALOR DE LA ACELERACIÓN
ax = (float)accelCount[0]*aRes - accelBias[0];
ay = (float)accelCount[1]*aRes - accelBias[1];
az = (float)accelCount[2]*aRes - accelBias[2];

mpu6050.readGyroData(gyroCount);
//LECTURA DEL CONVERTIDO A/D DEL ACELEROMETRO
mpu6050.getGres();

// CALCULO DE LOS VALORES DEL GIROSCOPIO DADO EN GRADOS/SEG.
gx = (float)gyroCount[0]*gRes; // - gyroBias[0];
gy = (float)gyroCount[1]*gRes; // - gyroBias[1];
gz = (float)gyroCount[2]*gRes; // - gyroBias[2];

tempCount = mpu6050.readTempData(); // LECTURA DE LOS DATOS DEL ADC
}

Now = t.read_us();

```

```

deltat = (float)((Now - lastUpdate)/1000000.0f) ;
//TIEMPO DE INTEGRACIÓN/ EL TIEMPO TRANSCURRIDO DESDE LA ULTIMA
//ACTUALIZACIÓN DEL FILTRO
lastUpdate = Now;

sum += deltat;
sumCount++;

if(lastUpdate - firstUpdate > 10000000.0f) {
    beta = 0.04; // DISMINUCIÓN DE LA GANANCIA DEL FILTRO DESPUES DE
    // ESTABILIZARSE
    zeta = 0.015; // aUMENTO DE LA GANANCIA DERIVATIVA DESPUES DE
    // ESTABILIZARSE
}

// CONVERSIÓN DE LOS DATOS DEL GIROSCOPIO A RADIANES /SEG
mpu6050.MadgwickQuaternionUpdate(ax, ay, az, gx*PI/180.0f, gy*PI/180.0f,
gz*PI/180.0f);
delt_t = t.read_ms() - count;
if (delt_t > 500) {

    yaw = atan2(2.0f * (q[1] * q[2] + q[0] * q[3]), q[0] * q[0] + q[1] *
q[1] - q[2] * q[2] - q[3] * q[3]);
    pitch = -asin(2.0f * (q[1] * q[3] - q[0] * q[2]));
    roll = atan2(2.0f * (q[0] * q[1] + q[2] * q[3]), q[0] * q[0] - q[1] *
q[1] - q[2] * q[2] + q[3] * q[3]);
    pitch *= 180.0f / PI; //CONVERSION A GRADOS
    yaw *= 180.0f / PI;
    roll *= 180.0f / PI;
    pc.printf("Yaw, Pitch, Roll: %f %f %f\n\r", yaw, ceil(pitch), roll);
    // DATOS DEL GIROSCOPIO EN GRADOS
    servo1();
    servo2();
    servo3();
    servo4();
    servo5();
    servo6();
    qq1=((grado5-
90)+180)*PI/180); qq2=((grado4*PI)/180); // Conversión de radianes
qq3=((grado3-90)*PI)/180); qq4=((grado2-90)*PI)/180); // a grados
        if(uart.readable()) {
            float mes;
            uart scanf("%f",&mes);
            pc.printf("%f\r\n", mes);
        }
    px=(cos((double)qq4) * ((11.5*cos((double)qq1)*sin((double)qq2)*sin((double)qq3))
-
(11.5*cos((double)qq1)*cos((double)qq2)*cos((double)qq3)))+(sin((double)qq4) * (
(11.5*cos((double)qq1)*sin((double)qq2)*cos((double)qq3)+(11.5*cos((double)qq1
)*cos((double)qq2)*sin((double)qq3)))-
(11.6*cos((double)qq1)*cos((double)qq2)*cos((double)qq3)+(11.6*cos((double)qq1
)*sin((double)qq2)*sin((double)qq3))-(10.3*cos((double)qq1)*cos((double)qq2));
    py=(cos((double)qq4) * ((11.5*sin((double)qq1)*sin((double)qq2)*sin((double)qq3))
-
(11.5*sin((double)qq1)*cos((double)qq2)*cos((double)qq3)))+(sin((double)qq4) * (
(11.5*sin((double)qq1)*sin((double)qq2)*cos((double)qq3)+(11.5*sin((double)qq1
)*cos((double)qq2)*sin((double)qq3)))-

```

```

(11.6*sin((double) qq1)*cos((double) qq2)*cos((double) qq3))+(11.6*sin((double) qq1
)*sin((double) qq2)*sin((double) qq3))-(10.3*sin((double) qq1)*cos((double) qq2));
pz=(-
cos((double) qq4)*((11.5*sin((double) qq2)*cos((double) qq3))+(11.5*cos((double) qq
2)*sin((double) qq3)))+(sin((double) qq4)*((11.5*sin((double) qq2)*sin((double) qq
3))-(11.5*cos((double) qq2)*cos((double) qq3))))-
(11.6*sin((double) qq2)*cos((double) qq3))-
(11.6*cos((double) qq2)*sin((double) qq3))-(10.3*sin((double) qq2))-7.5;

device.printf("#%dP%d#%dP%d#%dP%d#%dP%d#%dP%d#%dP%d#%dP%dT%d\r\n"
,s1,p1,s2,p2,s3,p3,s4,p4,s5,p5,s6,p6,v);
//DATOS AL CONTROLADOR DEL ROBOT
pc.printf("px: %f \n\r py: %f \n\r pz: %f\r\n ""
,px, py, pz);
//DATOS VISUALIZADOS EN LA HYPERTERMINAL
myled= !myled;
count = t.read_ms();
sum = 0;
sumCount = 0;
}
}

}

```

A3.1 Programa para la lectura del segundo giroscopio

```

#include "mbed.h"
#include "MPU6050.h"
float sum = 0;
uint32_t sumCount = 0;

MPU6050 mpu6050;
Timer t;
Serial pc(USBTX, USBRX); // tx, rx
Serial uart(PA_15, PB_7);
int main()
{
pc.baud(9600);
//Inicializar I2C
i2c.frequency(400000); // Frecuencia (400 kHz) I2C
t.start();

// INICIALIZACIÓN Y CHEQUEO DEL SENSOR
uint8_t whoami = mpu6050.readByte(MPU6050_ADDRESS, WHO_AM_I_MPU6050);
//LECTURA DE LOS REGISTROS DEL SENSOR MPU-6050
pc.printf("I AM 0x%x\n\r", whoami); pc.printf("ACTIVO 0x68\n\r");
if (whoami == 0x68) // SENSOR ACTIVO
{
pc.printf("MPU6050 EN LINEA...");
mpu6050.MPU6050SelfTest(SelfTest); //INICIALIZACIÓN AUTOEXAMINACIÓN Y VALORE
S

```

```

DE FABRICA
pc.printf("x-axis self test: acceleration trim within : ");
pc.printf("%f", SelfTest[0]); pc.printf("% of factory value \n\r");
pc.printf("y-axis self test: acceleration trim within : ");
pc.printf("%f", SelfTest[1]); pc.printf("% of factory value \n\r");
pc.printf("z-axis self test: acceleration trim within : ");
pc.printf("%f", SelfTest[2]); pc.printf("% of factory value \n\r");
pc.printf("x-axis self test: gyration trim within : ");
pc.printf("%f", SelfTest[3]); pc.printf("% of factory value \n\r");
pc.printf("y-axis self test: gyration trim within : ");
pc.printf("%f", SelfTest[4]); pc.printf("% of factory value \n\r");
pc.printf("z-axis self test: gyration trim within : ");
pc.printf("%f", SelfTest[5]); pc.printf("% of factory value \n\r");

if(SelfTest[0] < 1.0f && SelfTest[1] < 1.0f && SelfTest[2] < 1.0f &&
SelfTest[3] < 1.0f && SelfTest[4] < 1.0f && SelfTest[5] < 1.0f)
{
mpu6050.resetMPU6050(); // RESETEO DE LOS REGISTROS INICIA LA CALIBRACIÓN
mpu6050.calibrateMPU6050(gyroBias, accelBias); // CALIBRACIÓN COMPLETADA
mpu6050.initMPU6050(); pc.printf("MPU6050 LISTO...\n\r");
// LECTURA DE LOS DATOS ENTREGADOS POR EL SENSOR
}
else
{
pc.printf("EL SENSOR NO PASA LA EXAMINACIÓN\n\r");
}
}
else
{
pc.printf("CONECTE EL SENSOR POR FAVOR: \n\r");
pc.printf("%#x \n", whoami);
while(1) ; // CICLO INFINITO DECLARADO POR SI LA COMUNICACIÓN NO SE HA
// DETECTADO
}

while(1) {

// LOS REGISTROS DEL SENSOR ADQUIEREN NUEVOS DATOS
if(mpu6050.readByte(MPU6050_ADDRESS, INT_STATUS) & 0x01) { // CHECA LOS DATO
S
mpu6050.readAccelData(accelCount); // LEE LOS VALORES X, Y Y Z DEL
// ACELEROMETRO

mpu6050.getAres();

// CALCULO DEL VALOR DE LA ACELERACIÓN
ax = (float)accelCount[0]*aRes - accelBias[0];
ay = (float)accelCount[1]*aRes - accelBias[1];
az = (float)accelCount[2]*aRes - accelBias[2];

mpu6050.readGyroData(gyroCount);
//LECTURA DEL CONVERTIDO A/D DEL ACELEROMETRO
mpu6050.getGres();

// CALCULO DE LOS VALORES DEL GIROSCOPIO DADO EN GRADOS/SEG.
gx = (float)gyroCount[0]*gRes; // - gyroBias[0];
gy = (float)gyroCount[1]*gRes; // - gyroBias[1];

```

```

gz = (float)gyroCount[2]*gRes; // - gyroBias[2];

tempCount = mpu6050.readTempData(); // LECTURA DE LOS DATOS DEL ADC
}

Now = t.read_us();
deltat = (float)((Now - lastUpdate)/1000000.0f) ;
//TIEMPO DE INTEGRACIÓN/ EL TIEMPO TRANSCURRIDO DESDE LA ULTIMA
//ACTUALIZACIÓN DEL FILTRO
lastUpdate = Now;

sum += deltat;
sumCount++;

if(lastUpdate - firstUpdate > 1000000.0f) {
    beta = 0.04; // DISMINUCIÓN DE LA GANANCIA DEL FILTRO DESPUES DE
    // ESTABILIZARSE
    zeta = 0.015; // aUMENTO DE LA GANANCIA DERIVATIVA DESPUES DE
    // ESTABILIZARSE
}

// CONVERSIÓN DE LOS DATOS DEL GIROSCOPIO A RADIANES /SEG
mpu6050.MadgwickQuaternionUpdate(ax, ay, az, gx*PI/180.0f, gy*PI/180.0f,
gz*PI/180.0f);
delt_t = t.read_ms() - count;
if (delt_t > 500) {

yaw = atan2(2.0f * (q[1] * q[2] + q[0] * q[3]), q[0] * q[0] + q[1] *
q[1] - q[2] * q[2] - q[3] * q[3]);
pitch = -asin(2.0f * (q[1] * q[3] - q[0] * q[2]));
roll = atan2(2.0f * (q[0] * q[1] + q[2] * q[3]), q[0] * q[0] - q[1] *
q[1] - q[2] * q[2] + q[3] * q[3]);
pitch *= 180.0f / PI;//CONVERSION A GRADOS
yaw *= 180.0f / PI;
roll *= 180.0f / PI;
pc.printf("Yaw, Pitch, Roll: %f %f %f\n\r", yaw, ceil(pitch), roll);
// DATOS DEL GIROSCOPIO EN GRADOS

    if(uart.writeable()) //INICIA LA COMUNICACIÓN SERIAL
    {
        uart.printf("%1.3f_%1.3f",ceil(pitch),ceil(roll));
        pc.printf("%1.3f_%1.3f\r\n",pitch,roll);
    }

myled= !myled;
count = t.read_ms();
sum = 0;
sumCount = 0;
}
}
}

```