



**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y
MECÁNICA**

CARRERA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA

**TRABAJO DE TITULACIÓN, PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL
TÍTULO DE INGENIERO EN MECATRÓNICA**

**TEMA: COMPARACIÓN EXPERIMENTAL DE TÉCNICAS DE
TELEOPERACIÓN IMPLEMENTADAS EN EL TORSO ROBÓTICO
SALOSBOT MEDIANTE EL USO DE SENSORES INERCIALES Y
VISIÓN POR COMPUTADOR.**

AUTORES: BÁEZ MALDONADO, JOSÉ DANIEL

SALINAS DELGADO, SANTIAGO ANDRÉS

DIRECTOR: ING. IBARRA JÁCOME, OSWALDO ALEXANDER M.Sc.

SANGOLQUÍ – 2019



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

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

CERTIFICACIÓN

Certifico que el trabajo titulado *“COMPARACIÓN EXPERIMENTAL DE TÉCNICAS DE TELEOPERACIÓN IMPLEMENTADAS EN EL TORSO ROBÓTICO SALOSBOT MEDIANTE EL USO DE SENSORES INERCIALES Y VISIÓN POR COMPUTADOR.”*, realizado por los señores: **BÁEZ MALDONADO JOSÉ DANIEL** y **SALINAS DELGADO SANTIAGO ANDRÉS**, ha sido guiado y revisado periódicamente y cumple en su totalidad con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE, por lo que me permito acreditarlo y autorizar su sustentación y publicación.

Sangolquí, 09 de Octubre del 2018

Ing. Oswaldo Alexander Ibarra Jácome
Director del trabajo de titulación



DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA

CARRERA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA

AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD

Nosotros, **BÁEZ MALDONADO JOSÉ DANIEL** y **SALINAS DELGADO SANTIAGO ANDRÉS**, declaramos que éste trabajo de titulación "*COMPARACIÓN EXPERIMENTAL DE TÉCNICAS DE TELEOPERACIÓN IMPLEMENTADAS EN EL TORSO ROBÓTICO SALOSBOT MEDIANTE EL USO DE SENSORES INERCIALES Y VISIÓN POR COMPUTADOR.*", ha sido desarrollado con base a una investigación exhaustiva, respetando derechos intelectuales de terceros, conforme a las referencias cuyas fuentes se incorporan en la bibliografía. Consecuentemente este trabajo es de nuestra autoría. En virtud de esta declaración, nos responsabilizamos del contenido, veracidad y alcance científico del proyecto de titulación en mención.

Sangolquí, 09 de Octubre del 2018

Bález Maldonado José Daniel

CC: 060378365-5

Salinas Delgado Santiago Andrés

CC: 172153406-1



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

AUTORIZACIÓN

Nosotros, **BÁEZ MALDONADO JOSÉ DANIEL** y **SALINAS DELGADO SANTIAGO ANDRÉS**, autorizamos a la Universidad de las Fuerzas Armadas la publicación, en la biblioteca virtual del trabajo de titulación: *"COMPARACIÓN EXPERIMENTAL DE TÉCNICAS DE TELEOPERACIÓN IMPLEMENTADAS EN EL TORSO ROBÓTICO SALOSBOT MEDIANTE EL USO DE SENSORES INERCIALES Y VISIÓN POR COMPUTADOR."*, cuyo contenido, ideas y criterios son de nuestra exclusiva responsabilidad y autoría.

Sangolquí, 09 de Octubre del 2018

Báez Maldonado José Daniel

CC: 060378365-5

Salinas Delgado Santiago Andrés

CC: 172153406-1

DEDICATORIA

A Dios, “¡Pues el Señor concede sabiduría! De su boca provienen el saber y el entendimiento.” (Proverbios 2:6 NTV).

A mis padres, Fausto y Alexandra, quienes con su amor y su ejemplo han sabido guiar mis pasos y me han llevado siempre a no conformarme y a soñar con alcanzar lo imposible.

A mis hermanos, pues han sido siempre una fuente de inspiración y motivación para mí, los amo y estoy muy orgulloso de ustedes.

José Daniel Báez Maldonado

DEDICATORIA

Este trabajo va indudablemente dedicado a mis padres, a mis hermanas y a mis abuelitos por ser los maravillosos seres que me formaron y ahora constituyen la razón de ser de mi existencia y de todo mi esfuerzo. Que estas páginas queden como constancia de mi eterna búsqueda por llenarlos de orgullo.

Santiago Andrés Salinas Delgado

AGRADECIMIENTO

A Dios, por su inmensa gracia y misericordia, porque aún en medio de todos nuestros errores e imperfecciones, Él permanece a nuestro lado y nos brinda de su amor inagotable. Sin Él, mi vida sería muy distinta.

A mis padres, quienes me han dado su apoyo total y me han guiado durante todos estos años, por ser esos luchadores y soñadores que nunca se dan por vencidos, que no tienen temor de darlo todo por las personas que aman.

A mi familia entera que, a pesar de la distancia, siempre ha permanecido unida, que me ha dado la dicha de vivir en medio de tanta diversidad y me ha enseñado que para el amor no existen barreras.

Al club ESPE AL MÁXIMO y a cada persona que a pasado a través del mismo, ya que ha sido un apoyo fundamental a lo largo de toda mi vida universitaria y me permitió vencer mis temores, desarrollar nuevas habilidades, crecer como persona y, sobre todo, me dio la oportunidad de influenciar y llevar esperanza a la vida de muchos.

A mi amiga incondicional Alejandra, que siempre me ha apoyado, ha estado a mi lado en los momentos buenos y en los difíciles, que nunca ha dejado de creer en mí y me ha enseñado que cada día debemos seguir creciendo y mejorando.

A mis amigos, quienes han sido y seguirán siendo mi segunda familia y me han brindado su apoyo, guía y consejo cuando mi familia ha estado lejos.

A cada amigo, compañero y docente de esta hermosa universidad, que me han acompañado, enseñado e inspirado profundamente en el ámbito profesional, y con quienes hemos compartido tantos momentos únicos e inolvidables a lo largo de esta etapa.

José Daniel Báez Maldonado

AGRADECIMIENTO

A mis padres, por enseñarme a caminar dos veces y nunca perder la fe.

A mis hermanas por el apoyo incondicional.

A mis abuelos, tíos, primos y todas las personas que a lo largo de mi vida he tenido el privilegio de llamar familia, por ser refugio, compañía y consejo.

A mis amigos, camaradas y colegas, por las risas, experiencias y momentos compartidos.

A la vida, por cada día darnos una nueva oportunidad de superarnos a nosotros mismos.

Santiago Andrés Salinas Delgado

ÍNDICE DE CONTENIDO

CERTIFICACIÓN	i
AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD	ii
AUTORIZACIÓN	iii
DEDICATORIA	iv
DEDICATORIA	v
AGRADECIMIENTO	vi
AGRADECIMIENTO	vii
ÍNDICE DE CONTENIDO	viii
ÍNDICE DE TABLAS	xi
ÍNDICE DE FIGURAS	xiii
RESUMEN	xvi
ABSTRACT.....	xvii
CAPÍTULO I: GENERALIDADES	1
1.1. ANTECEDENTES.....	1
1.1.1. Componentes mecánicos previamente implementados	1
1.1.2. Componentes electrónicos previamente implementados.....	5
1.2. JUSTIFICACIÓN E IMPORTANCIA	6
1.3. ALCANCE.....	6
1.4. OBJETIVOS	7
1.4.1. OBJETIVO GENERAL.....	7
1.4.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	7
CAPÍTULO II: ESTADO DEL ARTE.....	8
2.1. TELEOPERACIÓN	8

2.1.1.	Interfaces Humano Máquina.....	9
2.1.2.	Control orientado a la robótica	10
2.1.3.	Aplicaciones.....	15
2.2.	UTILIZACIÓN DE SENSORES INERCIALES EN ROBÓTICA.....	17
2.3.	UTILIZACIÓN DE TÉCNICAS DE ESQUELETIZACIÓN EN ROBÓTICA.....	18
2.3.1.	Captura de movimiento:.....	18
2.3.2.	Esqueletización:	19
2.3.3.	Reconstrucción para robots físicos:	20
2.4.	TRABAJOS EXISTENTES.....	22
CAPÍTULO III: DESARROLLO DE TÉCNICAS DE TELEOPERACIÓN		28
3.1.	DESARROLLO DE LA CINEMÁTICA DIRECTA MEDIANTE LA CONVENCIÓN DENAVIT - HARTENBERG	28
3.2.	DESARROLLO DEL MÉTODO ITERATIVO USANDO EL JACOBIANO PARA RESOLUCIÓN DE CINEMÁTICA INVERSA	31
3.2.1.	Cinemática inversa de posicionamiento.....	32
3.2.2.	Cinemática inversa de orientación.....	39
3.3.	ADECUACIÓN DEL TORSO ROBÓTICO	40
3.4.	DESARROLLO DE LA TELEOPERACIÓN MEDIANTE ESQUELETIZACIÓN .	60
3.4.1.	Cálculo del ángulo del grado de libertad correspondiente a la cintura	61
3.4.2.	Cálculo de los ángulos para el brazo izquierdo	62
3.4.3.	Cálculo de los ángulos para el brazo derecho.....	66
3.5.	DESARROLLO DE LA TELEOPERACIÓN EN BASE A SENSORES INERCIALES	71
3.5.1.	Cálculo del ángulo del grado de libertad correspondiente a la cintura	76
3.5.2.	Cálculo de los ángulos para el brazo izquierdo	76
3.5.3.	Cálculo de los ángulos del brazo derecho.....	77
CAPÍTULO IV: PRUEBAS Y RESULTADOS		79

4.1. PROTOCOLO EXPERIMENTAL	79
4.1.1. Pruebas de exactitud	79
4.1.2. Pruebas de repetibilidad.....	81
4.1.3. Pruebas del tiempo de estabilización	82
4.2. PRUEBAS Y RESULTADOS DE LA TELEOPERACIÓN MEDIANTE ESQUELETIZACIÓN	82
4.2.1. Exactitud	82
4.2.2. Repetibilidad.....	90
4.2.3. Tiempo de estabilización	93
4.3. PRUEBAS Y RESULTADOS DE LA TELEOPERACIÓN EN BASE A SENSORES INERCIALES	93
4.3.1. Exactitud	93
4.3.2. Repetibilidad.....	101
4.3.3. Tiempo de estabilización	104
4.4. COMPARACIÓN DE LAS TÉCNICAS DE TELEOPERACIÓN DESARROLLADAS	104
4.4.1. Análisis adicionales	105
CAPÍTULO V: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	106
5.1. CONCLUSIONES	106
5.2. RECOMENDACIONES Y TRABAJOS FUTUROS.....	108
BIBLIOGRAFÍA	109

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 <i>Almacén del torso robótico</i>	2
Tabla 2 <i>Piezas de los brazos robóticos</i>	3
Tabla 3 <i>Motores Dynamixel</i>	4
Tabla 4 <i>Características de sistemas robóticos colaborativos de dos brazos</i>	23
Tabla 5 <i>Longitudes reales del torso robótico</i>	29
Tabla 6 <i>Parámetros Denavit-Hartenberg para el brazo izquierdo</i>	29
Tabla 7 <i>Parámetros Denavit-Hartenberg para el brazo derecho</i>	30
Tabla 8 <i>Parámetros Denavit-Hartenberg para el posicionamiento inverso</i>	35
Tabla 9 <i>Parámetros Denavit-Hartenberg para la orientación inversa</i>	39
Tabla 10 <i>Lista de requerimientos para el diseño de la articulación.</i>	42
Tabla 11 <i>Matriz morfológica para el diseño mecánico.</i>	43
Tabla 12 <i>Pesos de los elementos mecánicos de cada brazo.</i>	44
Tabla 13 <i>Momentos de inercia para todos los eslabones.</i>	49
Tabla 14 <i>Coordenadas de los centros de gravedad para todos los eslabones</i>	50
Tabla 15 <i>Evaluación de los diferentes tipos de transmisiones para la junta.</i>	55
Tabla 16 <i>Características para los engranes helicoidales de la transmisión.</i>	57
Tabla 17 <i>Factores de diseño para el trabajo de los engranes.</i>	58
Tabla 18 <i>Parámetros Denavit-Hartenberg para el cálculo de q_1, q_2</i>	62
Tabla 19 <i>Parámetros Denavit-Hartenberg para el cálculo de q_3, q_4</i>	63
Tabla 20 <i>Parámetros Denavit-Hartenberg para el cálculo de q_5, q_6</i>	64
Tabla 21 <i>Parámetros Denavit-Hartenberg para el cálculo de q_7</i>	65
Tabla 22 <i>Parámetros Denavit-Hartenberg para el cálculo de q_{11}, q_{12}</i>	67
Tabla 23 <i>Parámetros Denavit-Hartenberg para el cálculo de q_{13}, q_{14}</i>	68
Tabla 24 <i>Parámetros Denavit-Hartenberg para el cálculo de q_{15}, q_{16}</i>	69
Tabla 25 <i>Parámetros Denavit-Hartenberg para el cálculo de q_{17}</i>	70
Tabla 26 <i>Exactitud de posicionamiento para pose 1 esqueletización</i>	84
Tabla 27 <i>Exactitud de posicionamiento para pose 2 esqueletización</i>	85
Tabla 28 <i>Exactitud de posicionamiento para pose 3 esqueletización</i>	87
Tabla 29 <i>Exactitud de posicionamiento para pose 4 esqueletización</i>	88
Tabla 30 <i>Exactitud de posicionamiento para pose 5 esqueletización</i>	90

Tabla 31 <i>Resumen de exactitudes parciales y exactitud final para la técnica de esqueletización.....</i>	90
Tabla 32 <i>Resumen de repetibilidades parciales y repetibilidad final para la técnica de esqueletización</i>	92
Tabla 33 <i>Tiempos de estabilización para la técnica de esqueletización</i>	93
Tabla 34 <i>Exactitud de posicionamiento para pose 1 sensores inerciales.....</i>	95
Tabla 35 <i>Exactitud de posicionamiento para pose 2 sensores inerciales.....</i>	96
Tabla 36 <i>Exactitud de posicionamiento para pose 3 sensores inerciales.....</i>	98
Tabla 37 <i>Exactitud de posicionamiento para pose 4 sensores inerciales.....</i>	99
Tabla 38 <i>Exactitud de posicionamiento para pose 5 sensores inerciales.....</i>	101
Tabla 39 <i>Resumen de exactitudes parciales y exactitud final para la técnica de teleoperación mediante sensores inerciales</i>	101
Tabla 40 <i>Resumen de repetibilidades parciales y repetibilidad final para la técnica de teleoperación mediante sensores inerciales.....</i>	103
Tabla 41 <i>Tiempos de estabilización mediante sensores inerciales.....</i>	104
Tabla 42 <i>Tabla comparativa de parámetros entre técnicas de teleoperación.....</i>	104

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Plataforma SalosBot.	2
Figura 2. Controlador USB2Dynamixel.	5
Figura 3. Esquema de conexión para el controlador y los motores.	5
Figura 4. Esquemática de un sistema de teleoperación.	8
Figura 5. Diferentes tipos de dispositivos hápticos: a) SpaceMouse b) Joystick YF2009 c) Dispositivo Phantom Omni.	9
Figura 6. Esquema de desacoplamiento cinemático.	13
Figura 7. Sistema quirúrgico Da Vinci.	16
Figura 8. Robot Militar PackBot.	16
Figura 9. Sensores inerciales montados en el brazo del teleoperador.	17
Figura 10. Arquitectura de esqueletización para el robot HRP2.	18
Figura 11. Sistema de captura de movimiento basado en marcadores.	19
Figura 12. Modelo del cuerpo humano basado en juntas mecánicas.	20
Figura 13. Captura de movimiento de patrones de caminata.	22
Figura 14. Teleoperación de un robot humanoide realizada por Yamane y otros.	22
Figura 15. a) ABB's Dual Arm Collaborative Robot, b) Baxter Collaborative Robot, c) Motoman SDA10, d) Twendy One Robot.	24
Figura 16. Sistema de teleoperación para un robot comercial NAO.	25
Figura 17. Teleoperación orientada a tareas para un robot industrial SD10.	26
Figura 18. Sistema de teleoperación diseñado por Santander.	26
Figura 19. Plataforma didáctica para telerobótica desarrollada por Granda y Quiñónez.	27
Figura 20. Disposición de ejes DH para el brazo izquierdo del torso robótico.	28
Figura 21. Disposición de ejes DH para el brazo derecho del torso robótico.	30
Figura 22. Ubicación del punto central de la muñeca Pm.	32
Figura 23. Flujograma del algoritmo de posicionamiento inverso.	38
Figura 24. Modelo en V de diseño mecatrónico.	41
Figura 25. Bosquejo del corte realizado en la estructura.	43
Figura 26. Primera iteración de diseño para el torso superior del robot.	45
Figura 27. Rodamiento UCF201-12 de CMB Bearings.	47
Figura 28. Flujograma del algoritmo 3.2.	52
Figura 29. Flujograma del algoritmo 3.3.	54

Figura 30. Ventana de resultados del asistente de diseño de engranes de Autodesk Inventor.....	58
Figura 31. Análisis de elementos finitos para la articulación de la cintura realizado en el software Autodesk Fusion 360.	59
Figura 32. Puntos clave del cuerpo detectados por el Kinect V2.	60
Figura 33. Origen del sistema de coordenadas globales en el Kinect V2.....	61
Figura 34. Módulo GY-521.	71
Figura 35. Esquema de localización de sensores inerciales en el teleoperador.	72
Figura 36. Flujograma para el algoritmo 3.4	75
Figura 37. Subproceso “Configuración de sensor IMU”	76
Figura 38. Pose de prueba 1 para esqueletización.	83
Figura 39. Resultados en pose 1 esqueletización.....	83
Figura 40. Pose de prueba 2 para esqueletización.	84
Figura 41. Resultados en pose 2 esqueletización.....	85
Figura 42. Pose de prueba 3 para esqueletización.	86
Figura 43. Resultados en pose 3 esqueletización.....	86
Figura 44. Pose de prueba 4 para esqueletización.	87
Figura 45. Resultados en pose 4 esqueletización.....	88
Figura 46. Pose de prueba 5 para esqueletización.	89
Figura 47. Resultados en pose 5 esqueletización.....	89
Figura 48. Resultados lj y l en pose 1 esqueletización.	91
Figura 49. Resultados lj y l en pose 2 esqueletización.	91
Figura 50. Resultados lj y l en pose 3 esqueletización.	91
Figura 51. Resultados lj y l en pose 4 esqueletización.	92
Figura 52. Resultados lj y l en pose 5 esqueletización.	92
Figura 53. Pose de prueba 1 con sensores inerciales.....	94
Figura 54. Resultados en pose 1 con sensores inerciales.....	94
Figura 55. Pose de prueba 2 con sensores inerciales.....	95
Figura 56. Resultados en pose 2 con sensores inerciales.....	96
Figura 57. Pose de prueba 3 con sensores inerciales.....	97
Figura 58. Resultados en pose 3 con sensores inerciales.....	97
Figura 59. Pose de prueba 4 con sensores inerciales.....	98

Figura 60. Resultados en pose 4 con sensores inerciales.....	99
Figura 61. Pose de prueba 5 con sensores inerciales.....	100
Figura 62. Resultados en pose 5 con sensores inerciales.....	100
Figura 63. Resultados lj y l en pose 1 con sensores inerciales.	102
Figura 64. Resultados lj y l en pose 2 con sensores inerciales.	102
Figura 65. Resultados lj y l en pose 3 con sensores inerciales.	102
Figura 66. Resultados lj y l en pose 4 con sensores inerciales.	103
Figura 67. Resultados lj y l en pose 5 con sensores inerciales.	103

RESUMEN

Los constantes avances en el campo de la robótica, especialmente en aplicaciones para manipuladores robóticos antropomórficos, han generado la necesidad de encontrar mejores formas de controlar este tipo de robots. Con el tiempo, la teleoperación a través de esqueletización con visión por computador y el uso de sensores inerciales se han convertido en dos de las técnicas más exploradas. Sin embargo, a pesar de la gran cantidad de proyectos de investigación realizados en estas técnicas, existe muy poca información que nos permita realizar una comparación en su desempeño. El presente proyecto detalla la implementación y comparación experimental de las dos técnicas de teleoperación mencionadas, desarrolladas sobre un torso robótico de cadena cinemática redundante de 7 grados de libertad en cada brazo y 1 grado de libertad adicional compartido. Las pruebas se enfocaron en la evaluación de la exactitud, repetibilidad y tiempo de estabilización para contar con una comparación cuantitativa y así poder seleccionar la técnica más adecuada al momento de empezar un nuevo proyecto que involucre la teleoperación de algún manipulador robótico. Los resultados arrojaron una exactitud de 7.88 mm, repetibilidad de 22.95 mm y tiempo de estabilización de 4.56 s para la técnica esqueletización; mientras que el uso de sensores inerciales obtuvo una exactitud de 9.98 mm, repetibilidad de 31.01 mm y tiempo de estabilización de 4.79 s.

PALABRAS CLAVES:

- **TORSO ROBÓTICO**
- **TELEOPERACIÓN**
- **CADENA CINEMÁTICA REDUNDANTE**
- **ESQUELETIZACIÓN**
- **SENSORES INERCIALES**

ABSTRACT

The constant advances in the field of robotics, especially in applications for anthropomorphic robotic manipulators, have generated the need to find better ways to control this type of robots. Over time, teleoperation through skeletonization by computer vision and the use of inertial sensors have become two of the most explored techniques. However, despite the large number of research projects conducted in these techniques, there is very little information that allows us to make a comparison in their performance. The present project details the implementation and experimental comparison of the two mentioned teleoperation techniques, developed on a robotic torso of redundant kinematic chain of 7 degrees of freedom in each arm and 1 additional shared degree of freedom. The tests focused on the evaluation of the accuracy, repeatability and stabilization time to have a quantitative comparison and thus be able to select the most appropriate technique when starting a new project involving the teleoperation of a robotic manipulator. The results showed a precision of 7.88 mm, repeatability of 22.95 mm and a stabilization time of 4.56 s for the skeletonization technique; on the other hand, the use of inertial sensors obtained an accuracy of 9.98 mm, repeatability of 31.01 mm and stabilization time of 4.79 s.

KEYWORDS:

- **ROBOTIC TORSO**
- **TELEOPERATION**
- **REDUNDANT KINEMATIC CHAIN**
- **SKELETONIZATION**
- **INERTIAL SENSORS**

CAPÍTULO I

GENERALIDADES

1.1. ANTECEDENTES

La Universidad de las Fuerzas Armadas "ESPE", uno de los centros de Educación Superior más prestigiosos del Ecuador (CEAACES, 2016), presenta varias líneas de investigación que contribuyen al desarrollo sustentable del país. (UGI-ESPE, 2016). Una de estas líneas es la de la automática, conteniendo el área de robótica. Entre los múltiples proyectos desarrollados en esa área se encuentra el proyecto de tesis de la carrera de Ingeniería Mecatrónica: “Diseño y construcción de un torso robótico colaborativo de dos brazos para la unión de una junta emperrada en una celda de trabajo” (Carvajal & Martínez, 2016), el cual se utilizará como punto inicial para la realización del presente proyecto de tesis.

El presente trabajo de titulación plantea la realización de un estudio comparativo de la teleoperación con visión por computador y la basada en sensores inerciales. Para esto se trabajará sobre la plataforma robótica desarrollada por Carvajal y Martínez (Carvajal & Martínez, 2016), trabajo que a su vez obtuvo sus bases en el desarrollado por Sánchez y Terán (Sánchez & Terán, 2016), los cuales diseñaron e implementaron un brazo robótico antropomórfico de siete grados de libertad con una herramienta basada en algoritmos genéticos para la resolución del posicionamiento del mismo.

1.1.1. Componentes mecánicos previamente implementados




1.1.1.1. Armazón del torso robótico

El armazón del torso robótico, diseñado y ensamblado por Carvajal y Martínez (Carvajal & Martínez, 2016) y mostrado en la Figura 1, consiste de tres partes principales, detalladas en la Tabla 1.



Figura 1. Plataforma SalosBot.
Fuente:(Carvajal & Martínez, 2016).

Tabla 1
Almacén del torso robótico

Partes	Detalles	Ilustración	Material
Base del torso	Diseñada para alojar los componentes electrónicos		Tol 2mm
Tronco	Permite el acople de ambos brazos antropomorfos		Tol 1mm
Manipulador	Dos brazos antropomórficos de siete grados de libertad, que funcionan de manera colaborativa		ABS

Fuente: (Carvajal & Martínez, 2016).

La Tabla 2 indica a detalle las piezas que componen cada uno de los brazos antropomorfos.

Tabla 2
Piezas de los brazos robóticos

Piezas	Detalles	Ilustración	Material
Tapas del tronco	Sirven como base para los brazos antropomorfos		Tol 2mm
Base del manipulador	Encargado de anclar el brazo al torso		ABS
Eslabón 1	Conectado a la base del manipulador		ABS
Eslabón 2	Conectado con el eslabón 1		ABS
Eslabón 3	Conectado con el eslabón 2		ABS
Eslabón 4	Conectado con el eslabón 3		ABS
Eslabón 5	Conectado con el eslabón 4		ABS
Eslabón 6	Conectado con el eslabón 5		ABS
Soporte de Gripper	Conecta el manipulador con el efector final		ABS
Efector final tipo Gripper	Pinza acoplada al último eslabón		ABS

Fuente: (Carvajal & Martínez, 2016).

1.1.1.2. Servomotores Dynamixel

Los motores utilizados en las articulaciones, responsables de la movilidad de los eslabones, son servomotores Dynamixel¹ de tres modelos diferentes AX-12A (4 motores por brazo), MX-28T (1 motor por brazo) y MX-64T (3 motores por brazo), cuyas características constan en la Tabla 3.

Tabla 3
Motores Dynamixel

Especificaciones	AX-12A	MX-28T	MX-64T
Peso	54.6 g	72 g	126 g
Torque	1.5 Nm/16.5 Kgcm	3.1 Nm/31.6 Kgcm	7.3 Nm/74.4 Kgcm
Velocidad	59 rpm	97 rpm	78 rpm
Tensión de funcionamiento	9-12 Vdc	10-14.8 Vdc	10-14 Vdc
Consumo de corriente	1.5 A	1.3 A – 1.7 A	3.9 A – 5.2 A
Dimensiones	32 mm x 50 mm x 40 mm	35.6 mm x 50.6 mm x 35.5 mm	40.2 mm x 61.1 mm x 41 mm
Ángulo	300°	360°	360°
Reducción engranes	254:1	193:1	200:1
Material de tren	Plástico	Acero endurecido	Acero endurecido
Sensor de posición	Potenciómetro	Codificador magnético	Codificador magnético
Protocolo de comunicación	TTL	TTL/RS-485	TTL/RS-485
Velocidad de comunicación	1 Mbps	3 Mbps	3 Mbps
Cumplimiento/PID	Cumplimiento	PID	PID
Fotografía del motor			

Fuente: (TrosenRobotics, 2015).

¹ Los servomotores Dynamixel son actuadores inteligentes compuestos por la integración de un motor DC + caja de reducción + controlador + driver + red de comunicación (Robotis, 2015).

1.1.2. Componentes electrónicos previamente implementados

1.1.2.1. Controlador USB2Dynamixel

El controlador USB2Dynamixel es un controlador capaz de controlar cualquier red de actuadores Dynamixel conectados de forma serial, utilizando un puerto USB o Serial desde un ordenador como se muestra en la Figura 2.



Figura 2. Controlador USB2Dynamixel.

Fuente: (Carvajal & Martínez, 2016).

El controlador se puede programar con librerías de soporte en entornos como Matlab, Microsoft Visual Studio, Java, C, C++, Visual Basic, Python y Labview. El adaptador para este controlador consta de tres puertos de comunicación adicionales al puerto USB, los cuales son:

- TTL: Conector de 3 pines utilizados con las series Dynamixel AX. Los actuadores AX-12A, AX-18 y el módulo sensor AX-S1 se conectan en este puerto.
- RS485: Conector de 4 pines, utilizados con la serie Dynamixel de altas prestaciones DX, RX, EX.
- RS232 DB9: De 9 pines, ideal para conectar el adaptador ZIG2Serial.

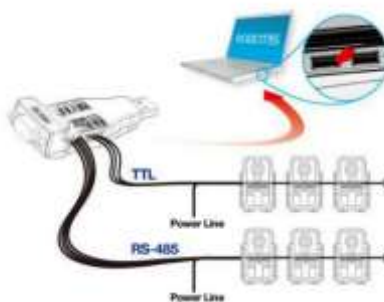


Figura 3. Esquema de conexión para el controlador y los motores.

Fuente: (Carvajal & Martínez, 2016).

1.2. JUSTIFICACIÓN E IMPORTANCIA

A partir del análisis del estado del arte existente en cuanto a la teleoperación, el desarrollo de un estudio comparativo que permita identificar la técnica más adecuada para la teleoperación de sistemas robóticos se ha considerado una necesidad para el impulso de la investigación en este campo. Los resultados cuantitativos obtenidos al concluir este estudio experimental pretenden representar una base sobre la cual se desarrollen futuros trabajos de investigación para solucionar de una manera más adecuada la falta de naturalidad en el movimiento de brazos robóticos antropomorfos.

La importancia de la investigación en la academia, ha promovido la realización de trabajos que han dado paso a varios desarrollos futuros. El presente proyecto inicia con el brazo robótico antropomórfico de siete grados de libertad diseñado y construido por Sánchez y Terán (Sánchez & Terán, 2016), con análisis cinemático y dinámico mediante algoritmos genéticos. Dos de estos brazos de siete grados de libertad fueron utilizados como base para la implementación del torso robótico colaborativo diseñado y construido por Carvajal y Martínez (Carvajal & Martínez, 2016), orientado a la unión de una junta empernada en una celda de trabajo.

Mediante el proyecto propuesto, se utiliza la plataforma Salosbot para realizar un estudio entre dos técnicas de teleoperación relevantes en la industria, las cuales son el uso de sensores inerciales y la técnica de esqueletización, con la finalidad de evaluar su desempeño y compararlas. Lo cual contribuye al desarrollo del campo de la teleoperación, teniendo en cuenta la importancia de éste en diversas aplicaciones de la robótica y la automatización.

1.3. ALCANCE

La primera fase del proyecto consistió en la repotenciación de la primera articulación de cada brazo, para lo cual se diseñó un nuevo acople entre el motor y el segundo eslabón de la cadena cinemática de cada robot, se obtuvo una mejora visible en el movimiento de las articulaciones. A continuación, se pasó a realizar la resolución de la cinemática inversa del actuador mediante métodos iterativos utilizando el Jacobiano del mismo, en base a esto se facilitó el cálculo del torque de un actuador tentativo localizado en la cintura del robot, una vez que el motor estuvo dimensionado se comenzó la manufactura de las partes necesarias para su adición al sistema,

así como modificaciones en las piezas existentes. A partir de este trabajo se obtuvo una plataforma óptima para desarrollar los sistemas de teleoperación, los cuales se desarrollaron en paralelo, para el de visión por computador se utilizó el sensor Kinect², implementando un código en Matlab³ que obtenía las coordenadas de puntos clave de las extremidades del usuario y transformaba las mismas en giros de motor; mientras que de los sensores inerciales se obtuvo ángulos de navegación de cada extremidad que también fueron traducidos a coordenadas, al obtener ambos sistemas funcionales se pasó a realizar la cuantificación de la exactitud, repetibilidad y tiempo de estabilización de los mismos.

1.4. OBJETIVOS

1.4.1. OBJETIVO GENERAL

Realizar una comparación experimental de técnicas de teleoperación en un torso robótico mediante el uso de sensores inerciales y técnica de esqueletización.

1.4.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Mejorar y adecuar el torso robótico existente en el laboratorio de manufactura de la Universidad de las Fuerzas Armadas “ESPE”, para poder manipularlo mediante técnicas de teleoperación.
- Implementar la teleoperación del torso robótico utilizando sensores inerciales, mediante la determinación de la orientación de cada eslabón.
- Implementar la teleoperación del torso robótico utilizando un sensor Kinect, mediante la esqueletización de los datos obtenidos.
- Analizar la información obtenida durante el uso de los métodos de teleoperación mencionados para realizar una comparación entre ambos métodos y concluir cuál es el más adecuado en base a parámetros establecidos en la norma ISO 9283⁴.

² Kinect es un tipo de cámara 3D desarrollado por Microsoft originalmente para Xbox (Microsoft, 2018).

³ Matlab es el software de desarrollo de algoritmos y análisis de datos de Mathworks (Mathworks, 2018).

⁴ La norma ISO 9283 está referida a referida a criterios de desempeño y métodos de prueba para robots industriales (ISO, 1998).

CAPÍTULO II

ESTADO DEL ARTE

2.1. TELEOPERACIÓN

Teleoperar significa controlar un sistema a la distancia, en robótica se refiere a una operación en la cual el trabajo cognitivo y toma de decisiones son realizados por un usuario humano mientras que la implementación mecánica la realiza un robot (Siciliano Bruno, 2016). Esta idea se conceptualiza denotando que la teleoperación es necesaria cuando existe una barrera entre el usuario y el entorno de trabajo, esta barrera puede ser tanto una distancia física entre ambos como también ambientes peligrosos para el ser humano.

La Figura 4 ejemplifica un sistema típico de teleoperación de un robot, es importante resaltar que para que el sistema sea completo es necesario proveer al usuario de varios métodos de retroalimentación en cuanto a la operación que está realizando el robot.

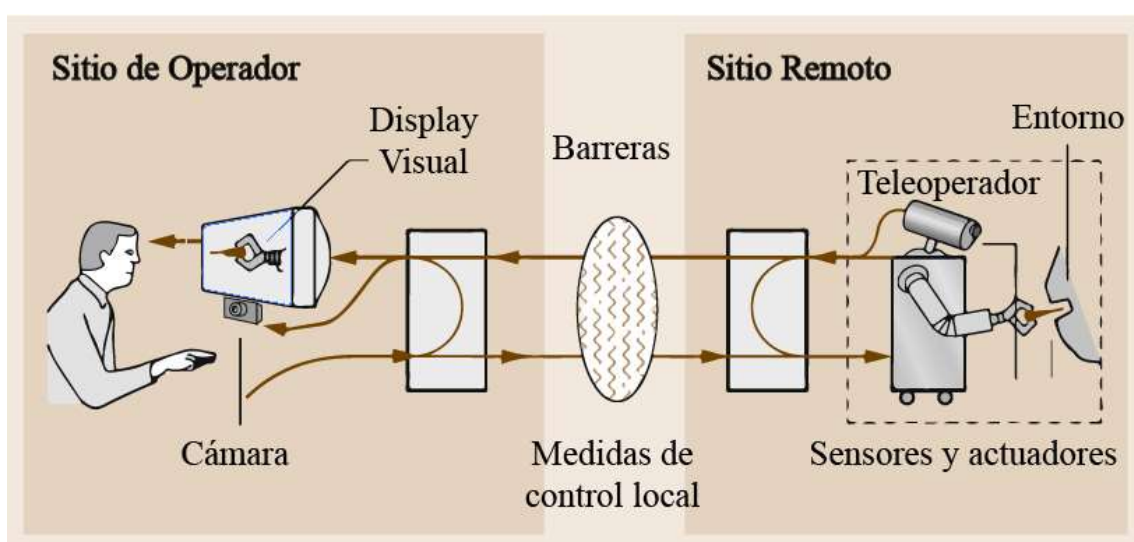


Figura 4. Esquemática de un sistema de teleoperación.
Fuente: (Siciliano Bruno, 2016)

2.1.1. Interfaces Humano Máquina

- **Dispositivos hápticos:** En robótica y realidad virtual, los dispositivos hápticos se definen en términos generales como interacciones táctiles reales y simuladas entre robots y humanos.

Las interfaces hápticas intentan replicar o mejorar la experiencia táctil de manipular o percibir un entorno real a través de dispositivos mecatrónicos y control por computadora. Consisten en un dispositivo háptico y una computadora de control con software que relaciona las entradas del operador humano con la pantalla de información, de manera que se genera un lazo de retroalimentación para teleoperación.

Los grados de libertad que brinde dicho dispositivo depende del diseño del mismo, en la Figura 5 (Intuitive Surgical, 2018), se ilustran algunos ejemplos como el SpaceMouse (3Dconnexion, 2018) y el Phantom Device (3D Systems, 2018), ambos dispositivos que brindan un control de 6 grados de libertad, como también un Joystick genérico para videojuegos, que controla hasta 3 grados de libertad.



Figura 5. Diferentes tipos de dispositivos hápticos:

- a) SpaceMouse
- b) Joystick YF2009
- c) Dispositivo Phantom Omni.

Fuente: (3D Systems, 2018) (3Dconnexion, 2018) (YF2009, 2018),.

- **Exoesqueletos:** Consiste en una interfaz donde un dispositivo mecánico está conectado al cuerpo del sujeto para realizar mediciones de variables de interés. Los sistemas tradicionales utilizan enlaces mecánicos que consisten en eslabones rígidos y sensores, dichos dispositivos son voluminosos y por lo tanto restringen significativamente la movilidad de los sujetos. Sin embargo, los sistemas más recientes utilizan trajes flexibles con sensores que no causan tanta restricción y también se ha venido desarrollando tecnología que involucra actuadores elásticos (SEA por sus siglas en inglés) que no limitan el movimiento del usuario, sino que se adaptan al movimiento del mismo.
- **Visión por computador:** Es la ciencia dedicada a la extracción y análisis automático de información a partir de una imagen o una secuencia de imágenes. Implica el desarrollo de una base teórica y algorítmica para lograr una comprensión visual automática (Asociación Británica de Visión por Computador, 2018).
- **Interfaces de voz:** Los comandos también pueden ser dictados por la voz del usuario, esta interfaz de teleoperación es atractiva debido a que permite al usuario una libertad de movimiento, sin embargo, al no proveer de un alto grado de control para sistemas complejos, es comúnmente usada para la activación de sub-tareas.

2.1.2. Control orientado a la robótica

A diferencia de un sistema normal de control robótico, en el que un robot realiza la ejecución de actividades o programas sin directrices del usuario, un sistema de control telerobótico está constantemente proveyendo información y requiriendo comandos al operador. Las arquitecturas de control utilizadas en esta rama de la robótica pueden ser divididas de acuerdo a su estilo y nivel de conexión en 3 categorías:

- **Control directo:** Es aquel que implica una carencia de autonomía por parte del sistema robótico, de manera que todos los movimientos del dispositivo esclavo son controlados por el operador a través de la interfaz maestra.

- **Control compartido:** Es la arquitectura denotada por tener una combinación de comandos directos del operador y retroalimentación sensorial local.
- **Control supervisado:** En este tipo de control los comandos del usuario ocurren en un alto nivel, el dispositivo esclavo depende de una robusta autonomía local para realizar las tareas dictadas por el operador.

Sin embargo, lo más común es encontrar sistemas que aplican una mezcla de los 3 tipos de arquitecturas citadas anteriormente. A continuación, se hablará de cada una de ellas con mayor detalle.

2.1.2.1. Control directo:

Se utiliza cuando se dificulta la implementación de autonomía local al robot, y es el tipo de control que está implementado en la mayoría de sistemas de teleoperación. Puede involucrar desde el comando de posicionamiento hasta el comando de velocidad y aceleración.

Acoplamiento cinemático

Para el comando de posicionamiento es posible considerar un acoplamiento cinemático entre el dispositivo maestro y el esclavo, es decir, un mapeo entre las posiciones de ambos. Es importante recordar que el mecanismo maestro se mueve en el espacio de trabajo maestro y el robot esclavo se mueve en el espacio de trabajo esclavo, el mapeo, en este caso, sirve para conectar estos dos espacios, que casi siempre serán diferentes.

Se debe proveer algún método de desacoplamiento temporal entre los dos mecanismos, con el objetivo de dejar que el operario descansa sin afectar el trabajo del robot o para permitir un desfase entre ambos sistemas, en telerobótica este sistema se denomina “embrague” (Siciliano Bruno, 2016).

Desacoplamiento cinemático:

Los robots controlados por computadora usualmente son actuados controlando las variables de ángulo de sus juntas, mientras que los objetos a ser manipulados son expresados en el sistema de coordenadas cartesiano, por lo que se necesita el procesamiento y envío de información cinemática en ambos sentidos, tanto en el espacio cartesiano, como en el definido por las variables de articulación. Para controlar la configuración del efector final al llegar a un punto especificado se debe resolver el problema de la cinemática inversa, de manera que el controlador pueda calcular las variables angulares correspondientes a la configuración deseada (Jazar, 2010).

El problema general de la cinemática inversa tiene una complejidad inherente para robots que mimetizan la morfología de un ser humano, sin embargo, para manipuladores con una disposición de tres grados de libertad para la orientación cuyos ejes de giro se intersecan en un punto único, es posible desacoplar el problema de cinemática inversa en dos problemas mucho más simples denominados problema de posicionamiento cinemático y orientación cinemática inversa (Spong, Hutchinson, & Vidyasagar, 2005). Poniéndolo en términos más simples, se descompone el problema original de 6 ecuaciones con 6 incógnitas en dos problemas de 3 ecuaciones con 3 incógnitas a ser encontradas, el primero resolviendo el posicionamiento del centro de intersección de los ejes de la muñeca, denominado centro de muñeca y el segundo resolviendo los ángulos de giro de dichos ejes de modo que se alcance la orientación deseada para el TCP⁵.

⁵ El TCP (del inglés Tool Center Point) o centro de herramienta, en robótica se refiere al punto de acción de la herramienta o efector final de cualquier manipulador robótico (Reyes, 2011).

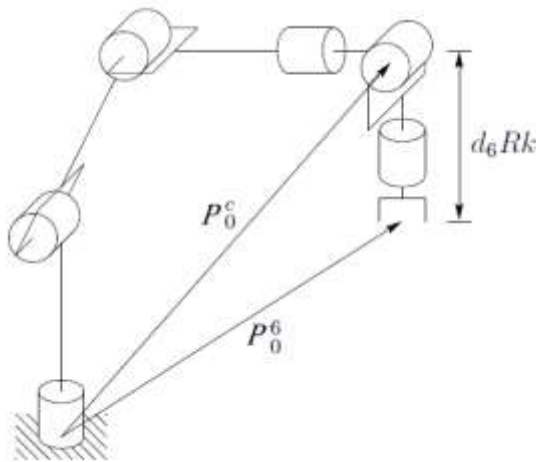


Figura 6. Esquema de desacoplamiento cinemático.
Fuente: (Spong, Hutchinson, & Vidyasagar, 2005).

En la Figura 6 se presenta una esquemática de la técnica de desacoplamiento cinemático para un robot de 6 grados de libertad, donde se calcula el vector P_0^c a partir de la posición deseada P_0^6 restando la distancia desde el TCP hasta el centro de la muñeca con la ecuación (2-1):

$$d = d_6 Rk \quad (2-1)$$

De modo que el posicionamiento cinemático inverso se calcula con las nuevas coordenadas:

$$P_0^c = P - d_6 R \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2-2)$$

Donde P y R son el posicionamiento y la orientación deseadas, cabe recalcar que para la resolución de este subproblema se puede utilizar cualquier tipo de método, desde los tradicionales hasta los iterativos para cadenas cinemáticas redundantes.

Control unilateral de aceleración y velocidad

En aplicaciones submarinas, aéreas o espaciales el robot esclavo por lo general es un vehículo actuado por propulsores; el control directo de este tipo de sistemas requiere que el usuario encienda o apague dichos propulsores, lo que a su vez acelera el vehículo.

Para otras aplicaciones, el usuario requerirá controlar la velocidad del robot. Es común que el dispositivo de control sea un joystick programado de manera que la señal de control sea directamente proporcional al desplazamiento del mismo. Para aplicaciones de 6 grados de libertad, en las que se necesita especificar tanto posicionamiento como orientación, es recomendable el uso de un “Space Mouse” como el implementado en las botoneras de los robots KUKA⁶ o, alternativamente el uso de dos joysticks, uno para el control de la posición y otro para el control de la orientación.

Este tipo de control es especialmente atractivo cuando el robot esclavo y el mecanismo maestro son fundamentalmente diferentes, desafortunadamente un posicionamiento correcto requiere de gran esfuerzo y experiencia por parte del operador.

2.1.2.2. Control compartido

El control compartido trata de combinar la confiabilidad y sentido de presencia alcanzable mediante el control directo con la inteligencia y seguridad de un control autónomo. Entre algunos ejemplos se destacan escenarios donde el robot corrige comandos de movimiento, regula subconjuntos de juntas (como las del efector final) o complementa los comandos especificados por el usuario.

Esta arquitectura es especialmente usada cuando existen retrasos de comunicación en la conexión, de manera que el operario especifica comandos de trabajo a grosso modo y el robot se encarga de seguirlos usando información sensorial para la toma de decisiones sencillas. También es atractivo que el robot se encargue de sub-tareas, como

⁶ KUKA es uno de los principales fabricantes a nivel mundial de robots industriales y sistemas de producción robotizados (KUKA, 2018)

mantener un agarre durante un largo periodo de tiempo o que el poder de procesamiento del robot sea usado para potenciar el trabajo del operario, como en el trabajo de Abbott et al. (Abbott, Marayong, & Okamura, 2007) donde se utilizan superficies virtuales superpuestas en la escena visual y háptica para el usuario. Para ayudar al operador a realizar tareas limitando el movimiento a regiones restringidas e influyendo su movimiento a lo largo de los caminos deseados.

2.1.2.3. Control supervisado

En general, las técnicas de control supervisado permiten que mayor autonomía e inteligencia pasen al sistema robótico. Hoy en día, los bucles de control autónomos simples se cierran en sitio de operación, y solo la información del estado y del modelo se transmite al sitio del operador. El operador supervisa de cerca el sistema telerobótico y decide exactamente cómo actuar y qué hacer.

2.1.3. Aplicaciones

La investigación en el campo de la teleoperación ha sido motivada por problemas de seguridad humana en entornos peligrosos, el alto costo de alcanzar entornos remotos, o la escala del trabajo a realizar. Después de su inicio en la investigación nuclear, los sistemas de teleoperación han evolucionado a muchos campos de aplicación. Casi en todos los lugares donde opera un robot, se pueden encontrar un sistema de teleoperación.

Uno de los ejemplos es el de la cirugía mínimamente invasiva, en la que un robot especializado permite realizar procedimientos a través de pequeñas incisiones, lo que reduce el trauma para el paciente en comparación con la cirugía tradicional. El sistema da Vinci, fabricado por (Intuitive Surgical, 2018) y mostrado en la Figura 7, es el único dispositivo disponible comercialmente en la actualidad.



Figura 7. Sistema quirúrgico Da Vinci.
Fuente: (Intuitive Surgical, 2018).

La teleoperación ha sido exitosamente implementada también en el ámbito militar, en labores de búsqueda y rescate para zonas de desastre o con robots que ayudan en la eliminación de minas u otro tipo de explosivos, como es el caso de PackBot (Army Technology, 2018), ilustrado en la Figura 8:



Figura 8. Robot Militar PackBot.
Fuente: (Army Technology, 2018).

2.2. UTILIZACIÓN DE SENSORES INERCIALES EN ROBÓTICA

Una IMU (siglas en inglés para Inertial Measurement Unit) o unidad de medición inercial es un dispositivo que basa su funcionamiento en tres acelerómetros ortogonales combinados con tres giroscopios, con los cuales a través de una doble integración proporciona una estimación de la velocidad y la posición de un objeto ubicado en el espacio. (Siciliano Bruno, 2016)

La teleoperación basada en estos sensores captura el movimiento de las extremidades superiores del operador, usándolos para estimar la orientación en base a los ángulos de navegación: cabeceo, alabeo y guiñado; o en cualquier sistema definido por el usuario.

Los dispositivos, por lo general, son colocados en el brazo, el antebrazo y la palma del operador y existen estudios que implementan esta técnica para la teleoperación de robots antropomórficos industriales en combinación con manos robóticas, tal como se muestra en la Figura 9.

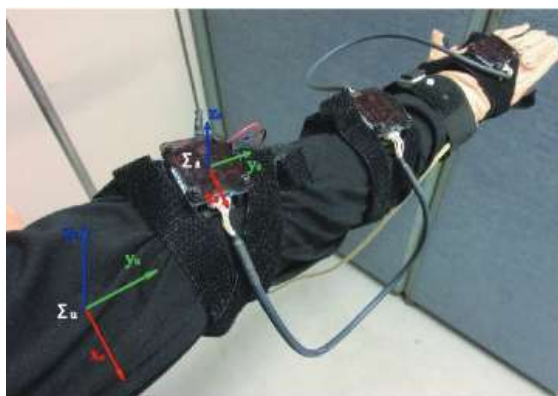


Figura 9. Sensores inerciales montados en el brazo del teleoperador.

Fuente: (Kobayashi, Hasegawa, Nakamoto, & Kojima, 2014).

En dicha investigación se hace uso de los tres acelerómetros incluidos en cada unidad de medición inercial para estimar de forma geométrica los ángulos de las articulaciones del operador y la transferencia de datos se realiza por medio de tecnología inalámbrica bluetooth para brindar libertad de movimiento al usuario (Kobayashi, Hasegawa, Nakamoto, & Kojima, 2014).

2.3. UTILIZACIÓN DE TÉCNICAS DE ESQUELETIZACIÓN EN ROBÓTICA

Los movimientos humanos representan un recurso valioso para los robots ya que pueden ser utilizados como una estrategia de control de movimiento. Son especialmente eficaces cuando el objetivo de control es difícil de formular, como por ejemplo cuando se trata de reproducir expresiones corporales del ser humano. Existen varias investigaciones donde se ha utilizado movimientos humanos para enseñar rutinas a un robot, entre ellas destacan trabajos como el de Nakoaka et al. (Nakoaka, Nakasawa, Hirukawa, & Ikeuchi, 2010) en el cual se implementó una técnica de esqueletización para enseñarle a un robot humanoide HRP2⁷ a bailar implementado un modelo de tarea basado en una secuencia de sub-tareas, tal como se muestra en la Figura 10.

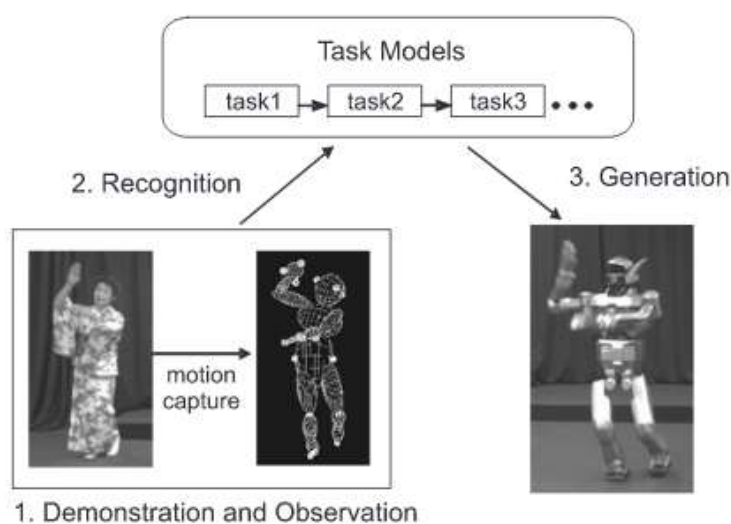


Figura 10. Arquitectura de esqueletización para el robot HRP2.
Fuente: (Nakoaka, Nakasawa, Hirukawa, & Ikeuchi, 2010).

2.3.1. Captura de movimiento:

La captura de movimiento se refiere a la medición de movimientos en el plano cartesiano, los sujetos de prueba por lo general son humanos, pero también se puede implementar en robots o animales. La tecnología más ampliamente usada es la óptica,

⁷ HRP-2 es una plataforma robótica diseñada e integrada por las industrias Kawada para formar parte del Proyecto de Robótica Humanoide auspiciado por los ministerios Japoneses de economía e industria.

gracias a que presenta una mínima interrupción en el movimiento del usuario. El equipo necesario para realizarlo incluye un amplio rango de cámaras de alta velocidad y resolución en conjunción con software especializado. Entre los problemas que tiene esta técnica se encuentra la oclusión o el etiquetado incorrecto. La Figura 11 muestra un tradicional sistema de captura de movimiento óptico en el que se pueden apreciar múltiples marcadores (círculos blancos) que son adheridos al cuerpo del usuario con el fin de que sean detectados por un sistema de cámaras.



Figura 11. Sistema de captura de movimiento basado en marcadores.

Actualmente se encuentra en desarrollo tecnología de captura de movimiento óptica sin marcadores que ofrezca procesamiento en tiempo real a un bajo costo, un ejemplo de un sistema comercial con estas prestaciones es el Kinect que comenzó siendo una interfaz para videojuegos, pero gracias a su potencial fue adoptado por la academia para el desarrollo de investigaciones tecnológicas de todo tipo.

2.3.2. Esqueletización:

Una vez que se obtienen los datos de captura de movimiento, se puede analizar los mismos mediante el cálculo de los ángulos de articulación, esto se realiza en base a un modelo cinemático del sujeto de prueba. Si bien se han desarrollado varios algoritmos para el análisis de movimiento y la simulación de robots, la aplicación de estos algoritmos en el cuerpo humano no es sencilla. El cuerpo humano es mucho más complejo que la mayoría de los sistemas mecánicos. Se compone de una serie de

elementos como huesos, músculos, órganos y piel, la mayoría de los cuales son deformables y difíciles de modelar. Muchas juntas también son difíciles de modelar y simular debido a las restricciones complejas. Por lo tanto, en la práctica, se aproxima el cuerpo humano a un modelo basado en juntas y eslabones como el que se muestra en la Figura 12.

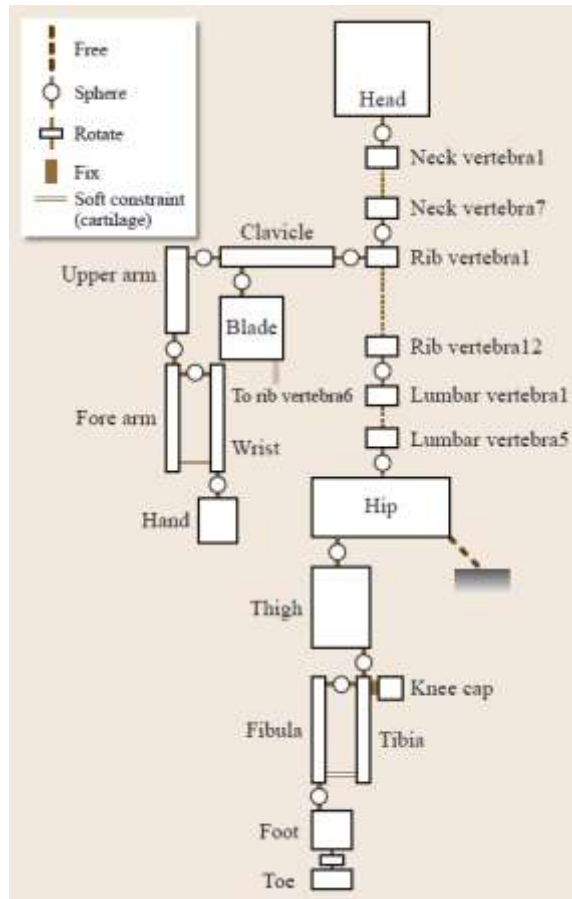


Figura 12. Modelo del cuerpo humano basado en juntas mecánicas.

Fuente: (Siciliano Bruno, 2016).

2.3.3. Reconstrucción para robots físicos:

El seguimiento de los movimientos humanos con un robot humanoide físico no es tan sencillo como puede parecer, incluso si el robot tiene una topología de cuerpo humano, esto se debe a varias diferencias entre el cuerpo humano y el cuerpo del robot.

Primero, siempre hay alguna diferencia en las propiedades cinemáticas, como las dimensiones y la proporción, simplemente copiar los ángulos de la articulación no resultará en las mismas posiciones para el manipulador si las longitudes de los brazos superior e inferior son diferentes. La diferencia cinemática no solo proviene de diferencias dimensionales, sino también de la flexibilidad del cuerpo humano la cual dificulta reproducir movimientos propios sus movimientos con dispositivos mecánicos.

En segundo lugar, el hardware del robot es generalmente mucho más restrictivo en términos de rango de movimiento de la articulación, así como de velocidad, aceleración y límites de par. Como resultado, los robots no siempre pueden realizar el mismo rango de movimiento que los humanos. Por lo tanto, tendríamos que modificar los movimientos originales para que estén dentro de los límites del hardware.

Finalmente, las propiedades inerciales, como la masa, la inercia y el centro de gravedad son diferentes. En movimientos que involucran control de balance, las diferentes propiedades inerciales pueden hacer que el movimiento sea desequilibrado y causar una caída del robot.

La esqueletización ha sido utilizada como medio para la realización de varias investigaciones, ya sea en la reproducción del movimiento en avatares simulados, como es el caso del trabajo de Da Silva et al. (Da Silva, Abe, & Popovic, 2008), o atacando el problema de las diferencias fundamentales entre la morfología del ser humano y la de un humanoide robótico, como se evidencia en el trabajo de Miura et al. (Miura, Morisawa, & Kanehiro, 2011) donde se generaron patrones efectivos de caminata para un robot HRP-4C⁸ basados en datos obtenidos por la captura de movimiento de una persona caminando.

⁸ El HRP-4C es un robot humanoide con fisionomía femenina que representa la cuarta iteración del Proyecto de Robótica Humanoide.

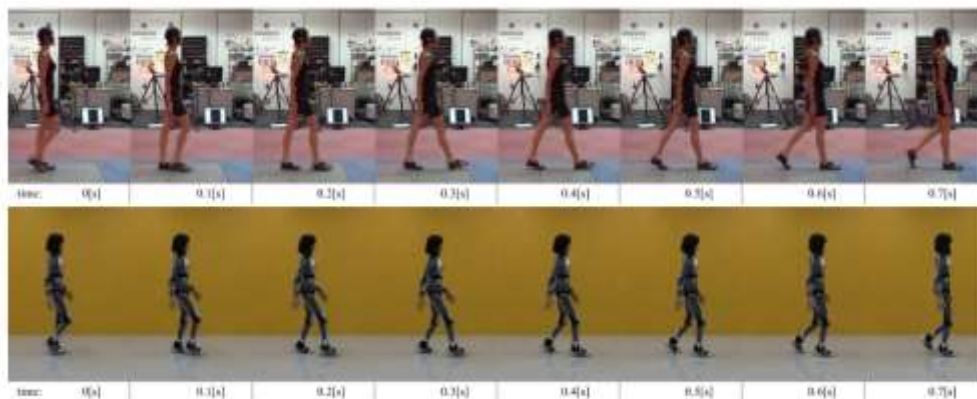


Figura 13. Captura de movimiento de patrones de caminata.
Fuente: (Miura, Morisawa, & Kanehiro, 2011).

También se han desarrollado sistemas que compensan las diferencias dinámicas de todo el cuerpo humano con su contraparte humanoide, como el trabajo perteneciente a Yamane et al. (Yamane, Anderson, & Hodgins, 2010).

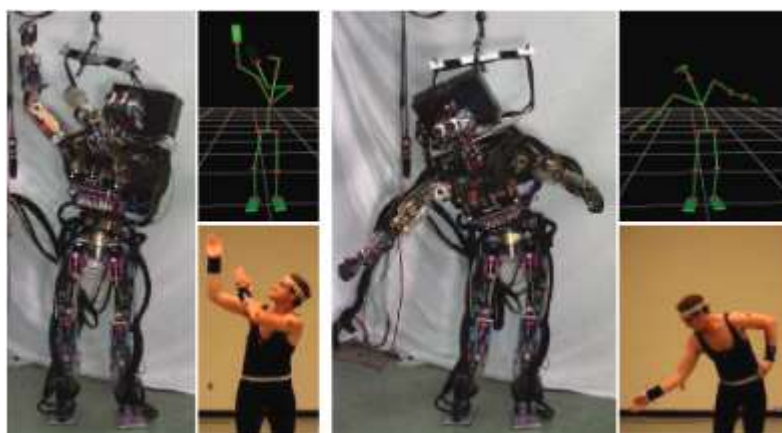


Figura 14. Teleoperación de un robot humanoide realizada por Yamane y otros.
Fuente: (Yamane, Anderson, & Hodgins, 2010).

2.4. TRABAJOS EXISTENTES

Existe una tendencia en la robótica hacia la réplica de la morfología del ser humano, en la Tabla 4 se puede evidenciar el avance de esta tendencia, en ella se detallan las características de algunos de los más importantes robots humanoides desarrollados hasta la fecha.

Tabla 4
Características de sistemas robóticos colaborativos de dos brazos

Robot	Base	Sensores	DoF
Samsung AM1	Fija	-	2X4
HRP2	2 piernas 6Dof	Muñeca F/T	2X6
SDA 10	Fija	-	2X7
SMART3	Fija	Muñeca F/T	2X6
EGP	Con ruedas	Muñeca F/T	2X7
PR2	Con ruedas	Gripper F	2X7
Dr Robot i90	Con ruedas	-	2X5
PowerCube	Fija	-	2X7
Armar III	Con ruedas	Juntas T	2X7
Js2 & RCH40	Fijo	Dedos F	6+5
Robonaut I	Con ruedas	Juntas F/T	2X7
Twendy-one	Con ruedas	Muñeca F/T	2X7
Mr. Helper	Con ruedas	Muñeca F/T	2X7
Rollin Justin	Con ruedas	Junta/dedos F/T	2X7
Pi4 Workerbot	Fija	Muñeca F/T	2X7
RIBA	Con ruedas	Piel táctil	2X7
Asimo	2 piernas 6Dof	Muñeca F/T	2X7
Cody	Con ruedas	Muñeca F/T	2X7
Domo	Fija	Junta T	2X6
Rosie	Con ruedas	Junta T	2X7
Aila	Con ruedas	Muñeca F/T	2X7
PUMA 560	Fija	Muñeca F/T	2X6
COMAU Smart-3S	Fija	Muñeca F/T	2X6
A465 + A255/CRS	Fija	Muñeca F/T	6+5

Fuente: (Smith, y otros, 2012).

En la mayoría de robots citados en la Tabla 4 se puede evidenciar un diseño similar en la estructura mecánica del brazo, este arreglo cinemático de 7 grados de libertad busca imitar la extremidad superior de un ser humano y crea este subgénero de robots antropomórficos que cuya configuración refleja la naturaleza mecánica de un brazo (la cual consta de tres grados de libertad en el hombro, un grado de libertad en el codo y tres grados en la muñeca) y a su vez los convierte en manipuladores inherentemente redundantes.

La redundancia cinemática ocurre cuando un manipulador posee más grados de libertad que los estrictamente necesarios para una tarea dada, es decir, es la tarea la que define la redundancia de un robot, independientemente de la configuración cinemática que este tenga (Siciliano Bruno, 2016). Sin embargo, ya que para cualquier tarea espacial el número mínimo de grados de libertad requerido es seis, un robot con más grados, es considerado inherentemente redundante.

El avance en el control de dichos robots redundantes ha avanzado tanto que ya se tiene algunos modelos disponibles comercialmente, como los ilustrados en la *Figura 15* donde se puede apreciar ejemplos de robots industriales con configuración de brazo dual, elaborados por empresas robóticas como ABB, Rethink Robotics y Yaskawa.



Figura 15. a) ABB's Dual Arm Collaborative Robot, b) Baxter Collaborative Robot, c) Motoman SDA10, d) Twenty One Robot.

En cuanto al método de teleoperación basada en visión por computador, este tuvo su comienzo en el 2005 cuando una interfaz fue implementada para la comunicación de un manipulador robótico de 6 grados de libertad; sin embargo, en dicha investigación todavía se requería el uso de un guante con marcas de referencia para registrar el movimiento del usuario (Kofman, 2005). Con el avance constante del campo de la visión por computador, este tipo de sistemas se fueron mejorando y se desechó la necesidad de cualquier tipo de referencia para la identificación del movimiento. La teleoperación se fue implementando en diferentes tipos de robot, entre ellos constan plataformas comerciales como el robot NAO (Filiatraut, 2014).

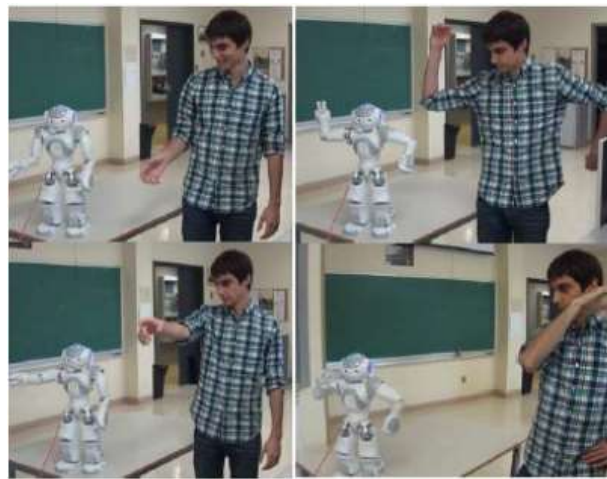


Figura 16. Sistema de teleoperación para un robot comercial NAO.
Fuente: (Filiatraut, 2014).

También se pusieron en práctica torsos colaborativos industriales de 15 grados de libertad en los que se implementó un sistema de telerobótica basado en la plataforma Kinect para un control coordinado orientado a tareas que también incluía reconocimiento de gestos para la realización de operaciones especiales (Kruse, 2015).

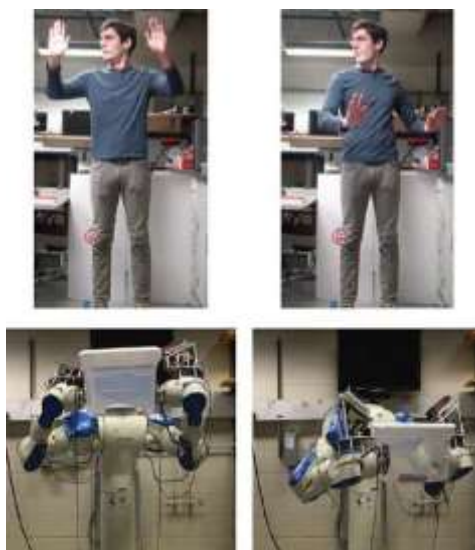


Figura 17. Teleoperación orientada a tareas para un robot industrial SD10.
Fuente: (Kruse, 2015).

Dentro de Universidad de las Fuerzas Armadas se han realizado diversos trabajos orientados a la telerobótica; entre los más recientes consta el de Santander (Santander Días, 2018) en el cual se desarrolló el control de movimiento de un robot humanoide mediante señales EMG y giroscopios dentro de un ambiente simulado, dicho trabajo propone un procesamiento digital de 9 articulaciones del cuerpo humano mediante el uso de unidades de medición inercial y señales mioeléctricas de los músculos responsables por dichas articulaciones, todo esto con el fin de minimizar el ruido en la adquisición de datos y obtener un sistema robusto de teleoperación.

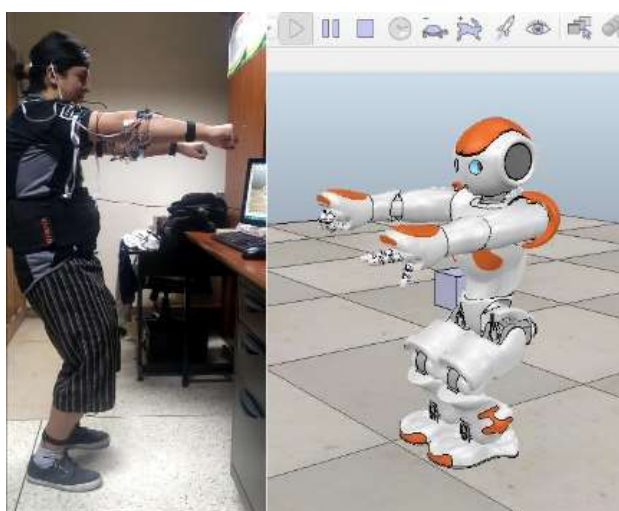


Figura 18. Sistema de teleoperación diseñado por Santander.
Fuente: (Santander Días, 2018).

En la Figura 18 se aprecian los resultados obtenidos por Santander (Santander Días, 2018), los cuales demuestran una reproducción fidedigna de los movimientos del usuario por parte del robot en el simulador, con lo cual se valida el sistema de teleoperación propuesto.

Otro de los trabajos en esta área fue el de Granda y Quiñónez (Granda & Quiñónez , 2016), en el cual se desarrolló una plataforma didáctica de un brazo robótico de 7 grados de libertad controlado de forma remota a través de un traje de captura de movimiento basado en sensores inerciales de 9 grados de libertad (3 acelerómetros, 3 giroscopios y 3 magnetómetros) conectados inalámbricamente, además de un sensor de flexión para el control del efector final del robot, tal como se muestra en la Figura 19.



Figura 19. Plataforma didáctica para telerobótica desarrollada por Granda y Quiñónez.
Fuente: (Granda & Quiñónez , 2016).

CAPÍTULO III

DESARROLLO DE TÉCNICAS DE TELEOPERACIÓN

El capítulo presenta el desarrollo de las técnicas de teleoperación para el torso robótico de 15 grados de libertad RT15D, y las adecuaciones previas para poder realizarlo, de acuerdo a los requerimientos y objetivos planteados al inicio del proyecto.

3.1. DESARROLLO DE LA CINEMÁTICA DIRECTA MEDIANTE LA CONVENCIÓN DENAVIT - HARTENBERG

Se desarrolló la cinemática directa del torso robótico mediante la convención Denavit – Hartenberg, tomando en cuenta los cambios físicos realizados en la estructura del mismo, incluyendo el grado de libertad adicional en la cintura. La disposición de los ejes para el brazo izquierdo se indica en la Figura 20.

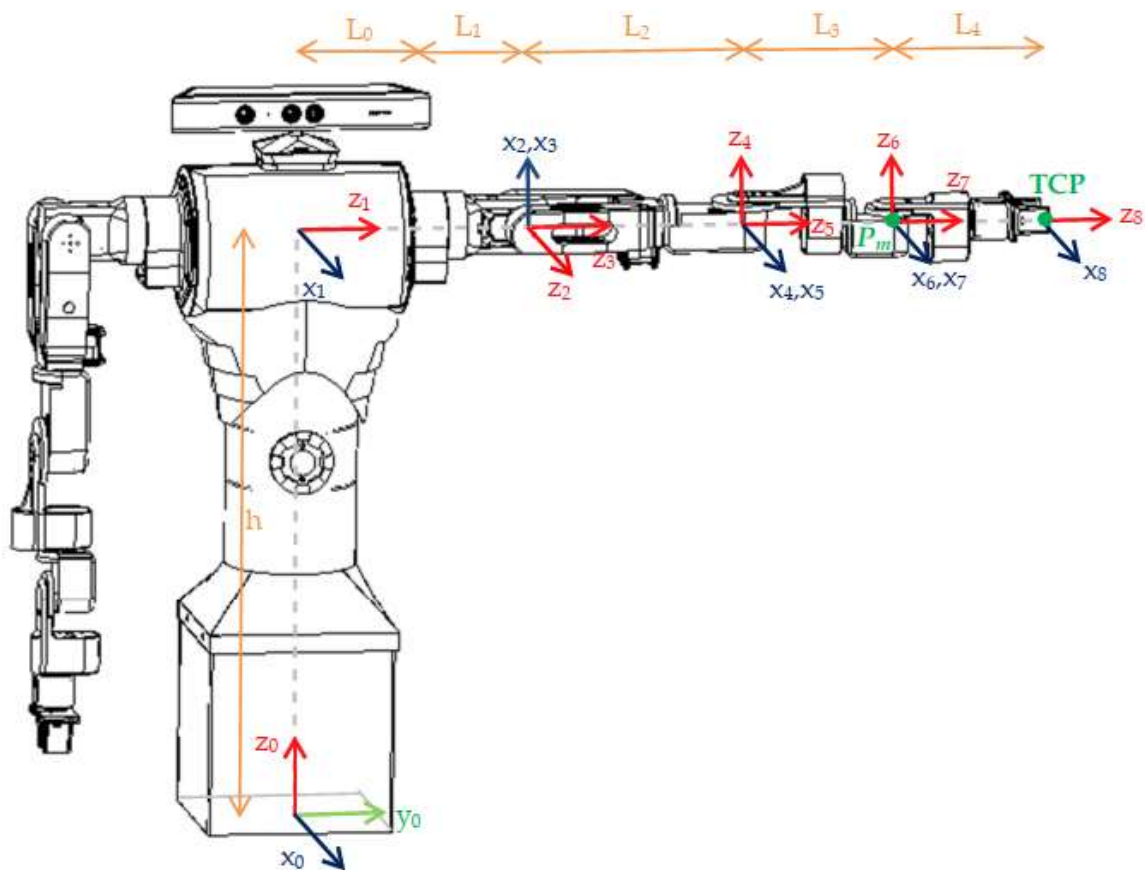


Figura 20. Disposición de ejes DH para el brazo izquierdo del torso robótico.

Siendo los valores de las constantes que representan las longitudes de los eslabones del torso robótico los que se detallan en la Tabla 5.

Tabla 5
Longitudes reales del torso robótico

Constante	Longitud (mm)
h	624
L_0	150
L_1	87
$(L_0 + L_1)$	237
L_2	239
L_3	157
L_4	166

En la Tabla 6 se detallan los parámetros DH utilizados para el desarrollo de la cinemática directa del brazo izquierdo, donde q_i son las variables angulares de cada articulación, llamadas también variables articulares.

Tabla 6
Parámetros Denavit-Hartenberg para el brazo izquierdo

	θ	α	d	a
0-1	q_0	-90°	h	0
1-2	$q_1 - 90^\circ$	-90°	$L_0 + L_1$	0
2-3	q_2	90°	0	0
3-4	$q_3 + 90^\circ$	90°	L_2	0
4-5	q_4	-90°	0	0
5-6	q_5	90°	L_3	0
6-7	q_6	-90°	0	0
7-8	q_7	0	L_4	0

De manera similar, la disposición de los ejes para el brazo derecho se indica en la Figura 21, de acuerdo a los parámetros DH detallados en la Tabla 7.

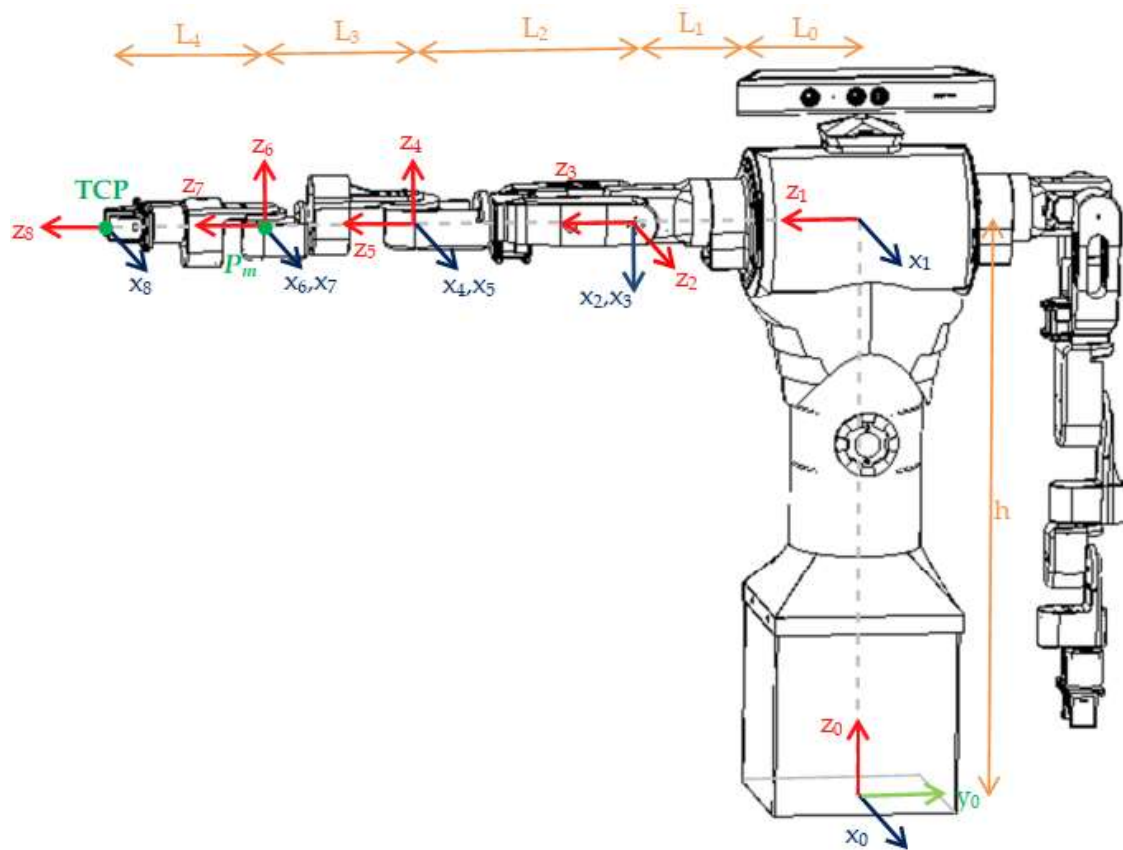


Figura 21. Disposición de ejes DH para el brazo derecho del torso robótico.

Tabla 7

Parámetros Denavit-Hartenberg para el brazo derecho

	θ	α	d	a
0-1	q_0	90°	h	0
1-2	$q_{11} - 90^\circ$	-90°	$L_0 + L_1$	0
2-3	q_{12}	90°	0	0
3-4	$q_{13} + 90^\circ$	-90°	L_2	0
4-5	q_{14}	90°	0	0
5-6	q_{15}	-90°	L_3	0
6-7	q_{16}	90°	0	0
7-8	q_{17}	0	L_4	0

3.2. DESARROLLO DEL MÉTODO ITERATIVO USANDO EL JACOBIANO PARA RESOLUCIÓN DE CINEMÁTICA INVERSA

El torso robótico consta de 7 grados de libertad independientes en cada brazo y 1 grado de libertad compartido por ambos brazos, resultando en un total de $N = 8$ grados de libertad por brazo. El número de grados de libertad necesarios para que el TCP, correspondiente al punto de acción del efector final, alcance una posición $[x, y, z]$ y orientación $[\theta, \psi, \phi]$ determinadas dentro del espacio de trabajo es $M = 6$. Ya que el número de grados de libertad de cada brazo es mayor al necesario ($N > M$), se presenta el fenómeno de redundancia cinemática (Siciliano, Sciavicco, Villani, & Oriolo, 2009). Para poder resolver la cinemática inversa de estas cadenas cinemáticas redundantes, se debe recurrir a métodos alternativos a los usados generalmente. Uno de estos métodos es la resolución en base al uso de algoritmos genéticos como el implementado por (Carvajal & Martínez, 2016) en el torso robótico SalosBot; sin embargo, el tiempo de respuesta resultaba ser demasiado alto alcanzando los 20 minutos. Existen además otros métodos iterativos más eficientes para encontrar la cinemática inversa de robots redundantes, entre los cuales el más común es conocido como el método Newton-Raphson (Jazar, 2010).

En el presente proyecto, se resolvió la cinemática inversa del torso robótico RT15D mediante desacoplamiento cinemático, separándose en dos problemas más sencillos, conocidos como cinemática inversa de posicionamiento y cinemática inversa de orientación (Spong, Hutchinson, & Vidyasagar, 2005). Esto involucra una disminución de coste computacional y, por lo tanto, una mejora en el tiempo de procesamiento, ya que parte de los cálculos se realizan de manera más directa. Se utilizaron los 3 grados de libertad más cercanos al efector final para la orientación y los 5 grados de libertad restantes para el posicionamiento, causando que el problema de redundancia cinemática se limite únicamente a la etapa de posicionamiento.

3.2.1. Cinemática inversa de posicionamiento

El torso robótico RT15D, al estar compuesto por dos brazos independientes, consta de dos TCPs distintos, uno para el brazo izquierdo el cual llamaremos TCP_L , y otro para el brazo derecho el cual llamaremos TCP_R . Por lo tanto, para resolver la cinemática inversa del torso se necesita indicar la posición $\mathbf{P} = [x, y, z]$ y orientación (ϕ, θ, ψ) deseada para cada uno de los brazos. La posición deseada para el brazo izquierdo está representada por el vector $\mathbf{P}_L = [x_L, y_L, z_L]$ y su orientación por los ángulos de Euler ϕ_L, θ_L, ψ_L . De manera similar, la posición deseada para el brazo derecho está representada por el vector $\mathbf{P}_R = [x_R, y_R, z_R]$ y su orientación por los ángulos de Euler ϕ_R, θ_R, ψ_R .

Para resolver el problema de posicionamiento, se disponen de 5 grados de libertad en total para cada brazo. El extremo final del eslabón conectado al último de estos cinco grados de libertad debe alcanzar la posición del punto central de la muñeca, llamado \mathbf{P}_m , el cual es el punto de intersección de los ejes de las articulaciones de la muñeca, correspondientes a los ejes de los últimos tres grados de libertad del brazo robótico, como se observa en la Figura 22.

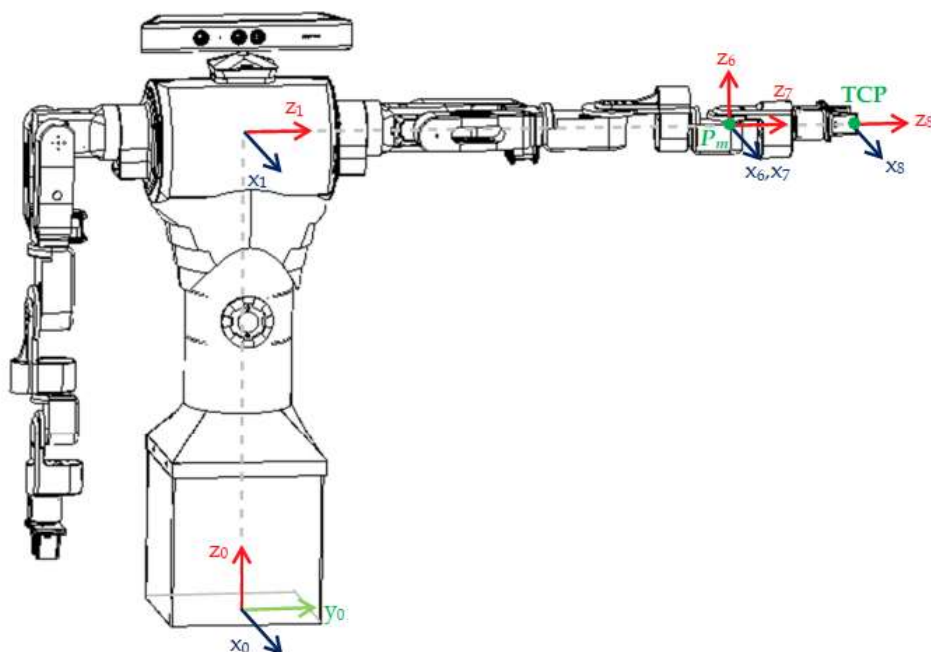


Figura 22. Ubicación del punto central de la muñeca \mathbf{P}_m .

Se debe calcular el valor de \mathbf{P}_m a partir de parámetros conocidos. Partimos desde la siguiente ecuación:

$$\mathbf{P} = \mathbf{P}_5^0 + \mathbf{P}_8^5 \quad (3-1)$$

Donde \mathbf{P}_5^0 equivale a \mathbf{P}_m en el caso particular del torso robótico RT15D y \mathbf{P}_8^5 puede ser calculado mediante:

$$\mathbf{P}_8^5 = L_4 R \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3-2)$$

Donde L_4 es la distancia entre el punto central de la muñeca y el TCP, o entre los puntos \mathbf{P}_m y \mathbf{P} . La matriz R es la matriz de rotación calculada en base la orientación deseada del efector final, en este caso dada por los ángulos de Euler (ϕ, θ, ψ) por lo cual es conocida como la matriz de Transformación de Ángulos de Euler-ZYZ (Spong, Hutchinson, & Vidyasagar, 2005) y está dada por la ecuación (3-3), donde $c_\alpha = \cos(\alpha)$ y $s_\alpha = \sin(\alpha)$, siendo α cualquier variable o ángulo dado.

$$R = \begin{bmatrix} c_\phi c_\theta c_\psi - s_\phi s_\psi & -c_\phi c_\theta s_\psi - s_\phi c_\psi & c_\phi s_\theta \\ s_\phi c_\theta c_\psi + c_\phi s_\psi & -s_\phi c_\theta s_\psi + c_\phi c_\psi & s_\phi s_\theta \\ -s_\theta c_\psi & s_\theta s_\psi & c_\theta \end{bmatrix} \quad (3-3)$$

De esta manera, la ecuación (3-1) puede escribirse también como:

$$\mathbf{P} = \mathbf{P}_m + L_4 R \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3-4)$$

$$\mathbf{P}_m = \mathbf{P} - L_4 R \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3-5)$$

$$\mathbf{P}_m = \begin{bmatrix} x_m \\ y_m \\ z_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x - L_4 c_\phi s_\theta \\ y - L_4 s_\phi s_\theta \\ z - L_4 c_\theta \end{bmatrix} \quad (3-6)$$

Mediante la ecuación (3-6) se puede obtener las coordenadas del punto central de la muñeca \mathbf{P}_m , dado que los demás valores involucrados son conocidos, y se procede a calcular los valores de las variables articulares destinadas a posicionamiento.

El valor de la variable articular q_0 para el grado de libertad ubicado en la cintura del torso robótico RT15D, el cual es compartido por ambos brazos, es calculado según la ecuación (3-7) con el fin de que la orientación del torso facilite el posicionamiento de ambos brazos en las coordenadas deseadas $[x_L, y_L, z_L]$ y $[x_R, y_R, z_R]$ con movimientos naturales.

$$q_0^* = \text{atan2}(x_R - x_L, y_L - y_R) \quad (3-7)$$

Nos quedan 4 grados de libertad libres por brazo para su respectivo posicionamiento: (q_1, q_2, q_3, q_4) para el brazo izquierdo y $(q_{11}, q_{12}, q_{13}, q_{14})$ para el brazo derecho. Es aquí que recae la redundancia cinemática, por lo cual los valores para estas cuatro variables articulares son calculados mediante el método iterativo de Newton Raphson y utilizando el jacobiano para cada uno de los brazos. Se parte de valores numéricos iniciales para (q_1, q_2, q_3, q_4) los mismos que van cambiando su valor en cada iteración hasta encontrar los valores que permitan alcanzar la posición deseada. Este método trabaja utilizando el error de posicionamiento \mathbf{e}_p , obtenido a partir de la posición deseada del centro de la muñeca \mathbf{P}_m y la posición evaluada \mathbf{P}_m^* del centro de la muñeca, como se indica en la ecuación (3-8).

$$\mathbf{e}_p = \mathbf{P}_m - \mathbf{P}_m^* \quad (3-8)$$

La posición evaluada \mathbf{P}_m^* es obtenida al reemplazar los valores numéricos actuales de las variables articulares (q_1, q_2, q_3, q_4) , conjunto al que llamaremos \mathbf{q}_m^* , en las expresiones resultantes a partir de la cinemática directa al utilizar únicamente los parámetros Denavit - Hartenberg correspondientes a las articulaciones de posicionamiento, como se describe en la Tabla 8.

Tabla 8*Parámetros Denavit-Hartenberg para el posicionamiento inverso*

	θ	α	d	a
0-1	q_0^*	-90°	h	0
1-2	$q_1 - 90^\circ$	-90°	$L_0 + L_1$	0
2-3	q_2	90°	0	0
3-4	$q_3 + 90^\circ$	90°	L_2	0
4-5	q_4	-90°	0	0
5-6	0	0	L_3	0

Se puede notar que se toma el valor cero en lugar de q_5 debido a que éste es un valor desconocido que no influye en cálculo de P_m^* . Utilizando estos parámetros calculamos la matriz de transformación homogénea para así obtener las funciones matemáticas de x_m, y_m, z_m .

$$H_6^0 = H_1^0 H_2^1 H_3^2 H_4^3 H_5^4 H_6^5 \quad (3-9)$$

$$\begin{bmatrix} x_m \\ y_m \\ z_m \\ 1 \end{bmatrix} = H_6^0 \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} = f(\mathbf{q}_m) \quad (3-10)$$

Si se sustituyen las variables articulares con sus respectivos valores numéricos \mathbf{q}_m^* calculados en cada iteración, observamos que $P_m^* = f(\mathbf{q}_m^*)$.

Adicionalmente, el método de Newton Raphson utiliza en su algoritmo las derivadas de las variables a encontrar; en el caso de problemas de cinemática inversa, la derivada del conjunto de variables q_m se calcula mediante la matriz del Jacobiano $J(\mathbf{q}_m)$ del robot.

$$J(\mathbf{q}_m) = \frac{\partial \mathbf{P}_m}{\partial \mathbf{q}_m} \quad (3-11)$$

$$\delta \mathbf{q}_m = J^{-1} \delta \mathbf{P}_m \quad (3-12)$$

Equivalente a

$$\dot{\mathbf{q}}_m = J^{-1} \mathbf{e}_p \quad (3-13)$$

Debido a la redundancia cinemática, el jacobiano no resulta ser una matriz cuadrada, por lo que no se puede calcular directamente la matriz inversa J^{-1} . Para solventar este problema, se utiliza la matriz llamada pseudoinversa J^\dagger (Siciliano Bruno, 2016)

$$J^\dagger = J^T (J J^T)^{-1} \quad (3-14)$$

Donde J^T es la matriz traspuesta del jacobiano. De tal forma que la ecuación (3-13) ahora puede ser calculada reemplazando la matriz inversa del Jacobiano por su respectiva pseudoinversa.

$$\dot{\mathbf{q}}_m = J^\dagger \mathbf{e}_p \quad (3-15)$$

Ahora podemos ya aproximar mediante varias iteraciones los valores adecuados de q_m según la ecuación (3-16), en la que se incorpora un factor adimensional a que determinará la rapidez y estabilidad en la convergencia de las iteraciones, el cual tomó un valor de $a = 0.4$ en el algoritmo implementado.

$$\mathbf{q}_m^{(i+1)} = \mathbf{q}_m^{(i)} + a J^\dagger(\mathbf{q}_m^{(i)}) \mathbf{e}_p \quad (3-16)$$

El algoritmo final implementado para el posicionamiento inverso se describe en el Algoritmo 3.1 y su diagrama de flujo en la Figura 23.

Algoritmo 3.1. Técnica iterativa para posicionamiento inverso

1. Indicar los valores numéricos de la posición $\mathbf{P} = [x, y, z]$ y orientación (ϕ, θ, ψ) deseadas para cada brazo.
2. Calcular el valor de $q_0 = \text{atan2}(x_R - x_L, y_L - y_R)$.
3. Calcular simbólicamente $H_6^0(q_1, q_2, q_3, q_4) = H_1^0 H_2^1 H_3^2 H_4^3 H_5^4 H_6^5$, según los parámetros D-H indicados en la Tabla 8.

4. Obtener la función simbólica de \mathbf{P}_m^* ,
$$\begin{bmatrix} x_m^* \\ y_m^* \\ z_m^* \\ 1 \end{bmatrix} = H_6^0 \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}$$

5. En base a la orientación dada (ϕ, θ, ψ) , calcular la matriz de rotación

$$R = \begin{bmatrix} c_\phi c_\theta c_\psi - s_\phi s_\psi & -c_\phi c_\theta s_\psi - s_\phi c_\psi & c_\phi s_\theta \\ s_\phi c_\theta c_\psi + c_\phi s_\psi & -s_\phi c_\theta s_\psi + c_\phi c_\psi & s_\phi s_\theta \\ -s_\theta c_\psi & s_\theta s_\psi & c_\theta \end{bmatrix}$$

6. Calcular la posición deseada para el punto central de la muñeca

$$\mathbf{P}_m = \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} - L_4 R \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}$$

7. Calcular el Jacobiano $J(q_1, q_2, q_3, q_4)$ del robot.
8. Configurar los valores para el factor $a = 0.4$ y un valor de error admisible $\epsilon = 2 \text{ mm}$.
9. Inicializar los valores de $q_1^{(0)}, q_2^{(0)}, q_3^{(0)}, q_4^{(0)}$ en la posición home o la posición actual del robot.

10. Inicializar el contador $i = 0$.

11. Calcular el error $\mathbf{e}_p = \mathbf{P}_m - \mathbf{P}_m^*(q_1^{(i)}, q_2^{(i)}, q_3^{(i)}, q_4^{(i)})$.

12. Si $|\mathbf{e}_p| < \epsilon$, terminar la iteración, la solución es $\mathbf{q}_m^{(i)} = \begin{bmatrix} q_1^{(i)} \\ q_2^{(i)} \\ q_3^{(i)} \\ q_4^{(i)} \end{bmatrix}$

13. Calcular $\mathbf{q}_m^{(i+1)} = \mathbf{q}_m^{(i)} + a J^\dagger(\mathbf{q}_m^{(i)}) \mathbf{e}_p$

14. Establecer $i = i + 1$ y regresar al paso 11.

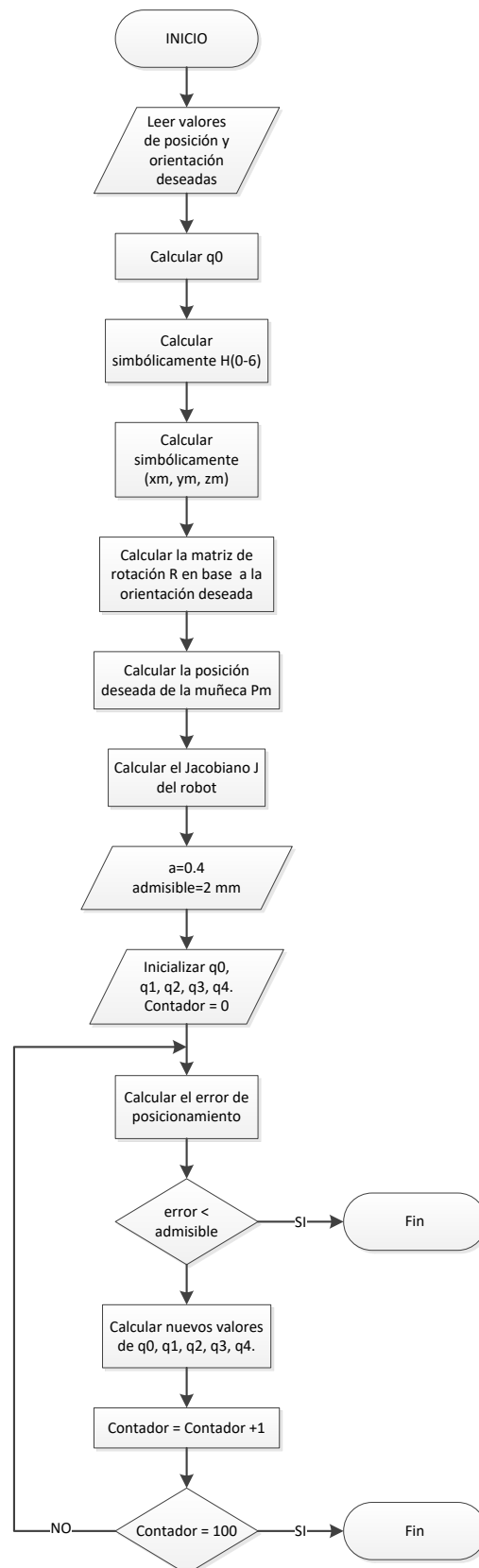


Figura 23. Flujograma del algoritmo de posicionamiento inverso.

3.2.2. Cinemática inversa de orientación

La disposición de los tres grados de libertad destinados a la orientación se ajusta a una muñeca esférica, también conocida como muñeca de Euler. Por lo tanto, se puede relacionar directamente a las variables articulares de orientación q_5, q_6, q_7 con los ángulos de Euler (ϕ, θ, ψ) (Spong, Hutchinson, & Vidyasagar, 2005). Los valores ahora conocidos de las variables articulares de posición determinan la orientación R_5^0 que deberá ser tomada como punto de partida para el cálculo de q_5, q_6, q_7 , en base a la ecuación (3-17).

$$R = R_5^0 R_8^5 \quad (3-17)$$

De forma que

$$R_8^5 = (R_5^0)^{-1} R = (R_5^0)^T R \quad (3-18)$$

Donde R_5^0 es la sección de rotación obtenida de la matriz de transformación homogénea $H_5^0 = H_1^0 H_2^1 H_3^2 H_4^3 H_5^4$, formada por los elementos de sus tres primeras filas y columnas. La matriz H_5^0 se calcula utilizando los valores de q_m^* ya calculados en el posicionamiento inverso y los parámetros DH descritos en la Tabla 9.

Tabla 9
Parámetros Denavit-Hartenberg para la orientación inversa

	θ	α	d	a
0-1	q_0^*	-90°	h	0
1-2	$q_1^* - 90^\circ$	-90°	$L_0 + L_1$	0
2-3	q_2^*	90°	0	0
3-4	$q_3^* + 90^\circ$	90°	L_2	0
4-5	q_4^*	-90°	0	0

La matriz de orientación final R ya se calculó previamente según la ecuación (3-3). El resultado es la matriz R_8^5 formada por los elementos numéricos conocidos r_{ij} .

$$R_8^5 = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix} \quad (3-19)$$

En base a la ecuación (3-3) calculamos los ángulos de Euler relativos $(\phi_m, \theta_m, \psi_m)$ correspondientes a la matriz de rotación R_8^5 , y las variables articulares q_5, q_6, q_7 mediante las relaciones (3-20) a (3-22) (Spong, Hutchinson, & Vidyasagar, 2005).

$$q_5 = \phi_m = \text{atan2}(r_{23}, r_{13}) \quad (3-20)$$

$$q_6 = -\theta_m = -\text{atan2}(\sqrt{1 - r_{33}^2}, r_{33}) \quad (3-21)$$

$$q_7 = \psi_m = \text{atan2}(r_{32}, -r_{31}) \quad (3-22)$$

3.3. ADECUACIÓN DEL TORSO ROBÓTICO

3.3.1. Repotenciación

El primer paso de la adecuación del torso robótico diseñado por Carvajal y Martínez (Carvajal & Martínez, 2016) fue la mejora del acoplamiento del tercer motor con el tercer eslabón de cada uno de los brazos antropomórficos del sistema.

El sistema anterior realizaba un acople directo entre el eslabón impreso en ABS⁹ y el disco del servomotor; buscando un mejor funcionamiento en las articulaciones correspondientes se diseñó una pieza intermedia ente los dos elementos mecánicos, dicha pieza cumple la función de simplificar el ensamblaje y aumentar la ventaja mecánica del actuador, con esto se obtuvo mejores resultados en cuanto al movimiento de ambas articulaciones. Cabe recalcar que también se realizó un redimensionamiento del cableado de todo el sistema con el fin de que el mismo ampare el trabajo del motor correspondiente al nuevo grado de libertad a ser añadido.

⁹ ABS es el nombre de una familia de termoplásticos, conocidos como plástico de ingeniería, y son altamente utilizados en la impresión 3D (Mariano, 2011).

3.3.2. Adición del grado de libertad en la cintura

Para el diseño del sistema mecánico correspondiente al grado de libertad en la cintura se utilizó la metodología basada en la norma VDI-2206 (VDI-2206, 2014) para sistemas mecatrónicos. La cual especifica un modelo de trabajo representado en la Figura 24.

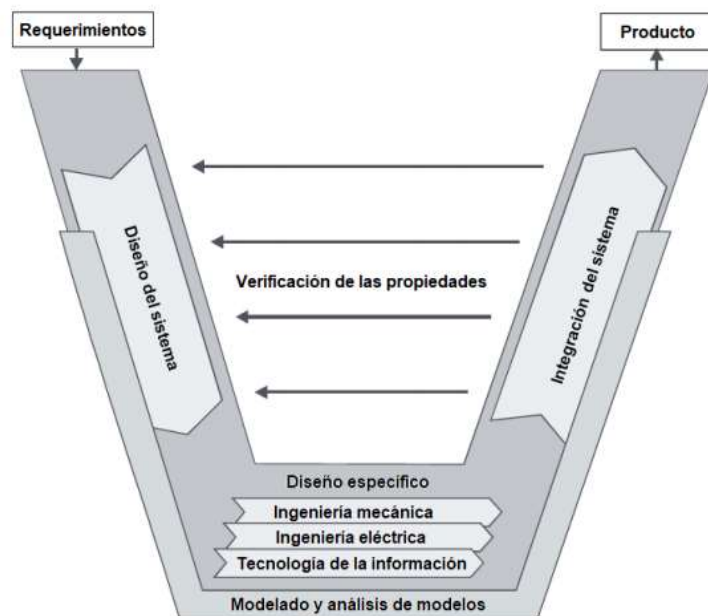


Figura 24. Modelo en V de diseño mecatrónico.

Fuente: (VDI-2206, 2014).

Dicha metodología especifica que el primer paso de diseño es la identificación de los requerimientos del sistema, los cuales son detallados en la Tabla 10.

Tabla 10*Lista de requerimientos para el diseño de la articulación.*

REQUERIMIENTO	PONDERACIÓN
Adicionar una articulación con movimiento fluido y un giro de 360 grados en la cintura del robot diseñado por Carvajal y Martínez (Carvajal & Martínez, 2016).	5
El actuador de dicha articulación deberá ser compatible con el sistema de control ya implementado.	5
Dimensionar el actuador y los componentes mecánicos de modo que aguanten la carga dinámica y estática de la articulación.	5
Proveer una compuerta de fácil acceso para el mantenimiento del actuador y el acople del mismo con el sistema.	4
Ocultar el cableado existente y el necesario para la implementación.	3
El diseño final debe tener una buena apariencia estética, ocultando los elementos mecánicos implementados con el fin de darle una apariencia humanoide.	3

En base a la lista de requerimientos propuesta se procedió a realizar la matriz morfológica de la Tabla 11 para determinar la mejor opción en las características de: torque de motor, acople mecánico a ser implementado y tipos de rodamientos para la articulación. Cabe recalcar que la marca comercial del motor se determinó directamente en base al segundo requerimiento de la Tabla 10, el cual especifica que el motor debe ser compatible con el sistema de control previamente implementado, por lo que las opciones de diseño se redujeron a servomotores de la marca Dynamixel de la serie MX. Dicha serie ofrece un rango de torque que va desde 3.1 N.m hasta 10 N.m, en caso de que el estudio del Lagrangiano determine que el torque elegido es insuficiente, se optará por un acople mecánico que brinde ventaja mecánica al actuador.

Tabla 11

Matriz morfológica para el diseño mecánico.

MOTOR			RODAMIENTOS	
Torque	Acople	Tipo	Disposición	Alojamiento
10 N.m	Matrimonio	De bolas	Fijo/libre	Chumacera
7.3 N.m	Poleas	De cilindros	Semifijos	Mecanizado
	Cadena	De aguja	Semifijos con rodamientos flotantes	
	Engranés		Semifijo con rodamientos fijos	

El primer paso en el diseño fue determinar el lugar de inserción de la articulación, la estructura base sobre la que se trabajó estaba compuesta por un cilindro horizontal y un cilindro vertical soldados entre sí, de modo que se planeó realizar un corte en el cilindro vertical para permitir un movimiento relativo entre la parte superior e inferior del mismo, se decidió realizar dicho procedimiento a 105 mm del centro del cilindro horizontal, tal como se ilustra en la Figura 25.

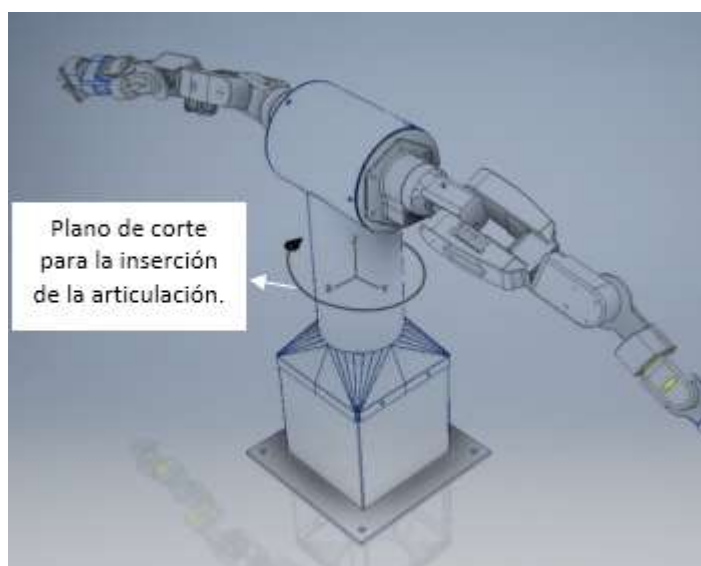


Figura 25. Bosquejo del corte realizado en la estructura.

Diseño del rodamiento:

Para guiar y apoyar un eje de transmisión son necesarios al menos dos rodamientos con cierta separación entre sí. Según la aplicación requerida se elige la disposición y el tipo de rodamientos a ser usados. La elección de los rodamientos para la articulación de la cintura se basó en los parámetros de selección listados en el manual técnico de selección de rodamientos y su disposición de NSK (NSK, 2016):

1. **Espacio de instalación:** Para simplificar el diseño se decidió usar la estructura del torso ya implementada, por lo que todo el acople mecánico debía poder ser instalado dentro de un cilindro de 140 mm de diámetro y 215 mm de altura. Esto limita el tamaño del rodamiento, de su alojamiento y del eje de transmisión en sí. Teniendo en cuenta esto, se comenzó el diseño estimando rodamientos de $\frac{3}{4}$ de pulgada.
2. **Índice de carga:** Se procedió a calcular y medir los pesos individuales de uno de los eslabones de cada brazo, así como los pesos de sus motores, detallándolos en la Tabla 12.

Tabla 12

Pesos de los elementos mecánicos de cada brazo.

ELEMENTO	PESO UNITARIO (g)	CANTIDAD	PESO TOTAL (g)
Placa base	427	1	427
Eslabón 0	65	1	65
Eslabón 1	205	1	205
Eslabón 2	283	1	283
Eslabón 3	105	1	105
Eslabón 4	65	1	65
Eslabón 5	44.4	1	44.4
Eslabón 6	41	1	41
Grpper	57.8	1	57.8
MX-64T	126	3	378
MX-28	72	1	72
AX-12 ^a	54.6	4	218.4
TOTAL:			1961.6

Con esto se obtuvo que los rodamientos deberían aguantar 3,923 kg de carga axial por cuenta de los dos brazos, adicional a esto se debía añadir el peso del cilindro horizontal, del eje de la articulación y los medios necesarios para su instalación. Para estimar esta carga se realizó un esquema tentativo utilizando el software de dibujo asistido por computador Autodesk Inventor, el cual sería la primera iteración del proceso de diseño y daría una aproximación a la carga real que soportaría el rodamiento y se puede apreciar en la Figura 26.

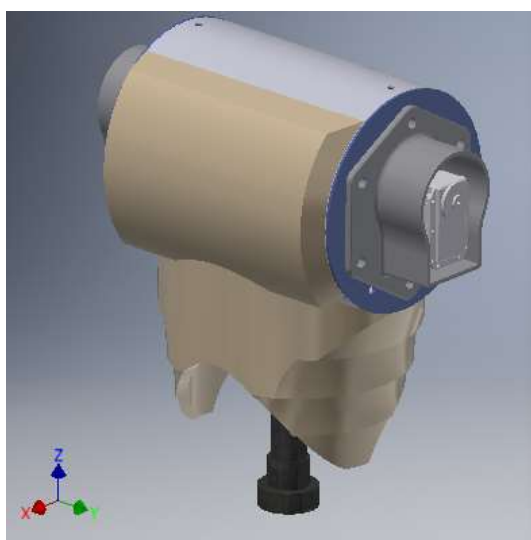


Figura 26. Primera iteración de diseño para el torso superior del robot.

- 3. Velocidad:** La velocidad angular de trabajo para los rodamientos viene dictada por el motor a ser usado. Debido a que en esta etapa de diseño el motor todavía no estaba dimensionado, se tomará la velocidad correspondiente al motor más rápido disponible, es decir la de 97 rpm correspondiente al motor MX-28T.
Es importante tener en cuenta que el tomar la velocidad máxima cuenta como un factor de seguridad impuesto para el dimensionamiento de los rodamientos, ya que al ser un prototipo, los actuadores del robot nunca trabajarán a dicha velocidad.
- 4. Deslizamiento de los anillos interior/externo:** Según NSK (NSK, 2016), se puede producir cierta inclinación en los rodamientos durante su periodo de trabajo, esta puede ser causada por deformaciones elásticas inducidas por la carga o por

errores dimensionales generados durante la manufactura de los elementos mecánicos. Si dicho ángulo de inclinación sobrepasa un rango aceptable se debe optar por un tipo de rodamiento autoalineante o en una unidad de rodamiento especial con una jaula que permita mayor ángulo de inclinación.

En la aplicación propuesta se descartaría la inclinación causada por la carga, sin embargo, se debe considerar posibles errores dimensionales durante la manufactura por lo que la optaría por el uso de chumaceras comerciales, las cuales son un tipo de jaula que permite un mayor ángulo de inclinación y simplifican la manufactura en comparación con otras opciones, como la del uso de rodamientos autoalineantes.

- 5. Disposición de los rodamientos:** Se seleccionó la disposición de rodamientos fijo/libre. Esta disposición es muy usada en la industria gracias a que provee una autocompensación contra errores dimensionales y la expansión térmica de los materiales, lo que asegura un funcionamiento ideal de la junta en todo momento.

Como su nombre lo indica, dicha configuración posee un rodamiento fijo, el cual va asegurado tanto al eje como al bastidor y es el que absorbe fuerzas radiales y axiales, mientras que el rodamiento libre solo absorbe fuerza radial y mediante un ajuste deslizante proporciona desplazamiento axial.

Dentro de esta disposición se puede colocar los rodamientos de modo que trabajen cara a cara o espalda con espalda, las denominadas configuraciones en X o en O respectivamente; para esta aplicación se utilizará la primera de dichas configuraciones, de modo que se pueda soportar cargas axiales en ambos sentidos y dándole una mayor rigidez al eje de transmisión.

Una vez evaluados los parámetros de diseño, se optó por el rodamiento UCF204-12 de 3/4 de pulgada de diámetro interno, montura tipo chumacera incluida y acople para aceitera, como consta en la Figura 27.



Figura 27. Rodamiento UCF201-12 de CMB Bearings.
Fuente: (IDRE-S.A., 2017).

Dimensionamiento del motor:

Se estableció que era necesaria la obtención del modelo dinámico del robot con la finalidad de obtener un correcto dimensionamiento del motor de la cintura. Esto debido a que dicho motor soportaría una significativa carga inercial y carga por aceleraciones causadas por el movimiento de ambos brazos robóticos. Por lo tanto, se recurrió al método basado en las ecuaciones de Euler-Lagrange, las cuales son descritas en la ecuación (3-24) y basan su funcionamiento en la obtención del Lagrangiano.

El Lagrangiano es una función que describe el estado de un sistema dinámico en términos de coordenadas de posición y sus derivadas en el tiempo, se define como la diferencia entre la energía potencial y la energía cinética, tal como lo dicta la ecuación (3-23).

$$\mathcal{L}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) = K(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) - P(\mathbf{q}) \quad (3-23)$$

De manera que las ecuaciones de Euler-Lagrange quedan descritas en función del Lagrangiano de la siguiente manera:

$$\frac{d}{dt} \frac{\delta \mathcal{L}}{\delta \dot{y}} - \frac{\delta \mathcal{L}}{\delta y} = F \quad (3-24)$$

En el libro de robótica de Reyes (Reyes, 2011) se especifica una instancia de esta ecuación aplicada al modelado de manipuladores robóticos, la cual viene dada de la siguiente forma:

$$\tau_i = \frac{d}{dt} \left[\frac{\delta \mathcal{L}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})}{\delta \dot{q}_i} \right] - \frac{\delta \mathcal{L}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})}{\delta q_i} \quad (3-25)$$

Usando esta ecuación se puede obtener el torque en la articulación i para cualquier instante de tiempo en función de las variables articulares de todo el sistema, Como se puede observar el modelo (3-25) es una ecuación diferencial compleja, de naturaleza continua y multivariable, por lo que será utilizada para calcular el torque máximo ejercido por el mecanismo robótico sobre la articulación de la cintura, para esto se recurrirá a métodos numéricos e iterativos.

El primer paso para realizar este procedimiento es calcular la ecuación del Lagrangiano, la cual consta de una parte cinética y una parte potencial, para el análisis de la articulación de la cintura solo se necesita despejar la parte cinética del mecanismo ya que el eje de rotación de dicha articulación es estático y paralelo al eje gravitatorio. Teniendo en cuenta esto, el Lagrangiano se simplificaría:

$$\mathcal{L}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) = K(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) \quad (3-26)$$

Conforme a Reyes (Reyes, 2011) la componente cinemática $K(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})$ de un eslabón incluye el movimiento de translación y de rotación, quedando:

$$K_i(q_i, \dot{q}_i) = \frac{1}{2} m_i \mathbf{v}_i^T \mathbf{v}_i + \frac{1}{2} I_i \left[\sum_i^n \dot{q}_i \right]^2 \quad (3-27)$$

Donde m_i, \mathbf{v}_i e I_i son la masa del eslabón, es el vector de velocidades lineales en el centro de gravedad y los momentos de inercia en el i -ésimo eslabón. Sin embargo, se puede reescribir la fórmula (3-27) de manera que se utilice el Jacobiano para el cálculo de las velocidades lineales y angulares de cada eslabón:

$$K_i(q_i, \dot{q}_i) = \frac{1}{2} m_i \mathbf{v}_i^T \mathbf{v}_i + \frac{1}{2} \boldsymbol{\omega}_i^T I \boldsymbol{\omega}_i \quad (3-28)$$

Donde I es la matriz de momentos de inercia de cada eslabón, la cual viene dada de la forma:

$$I = \begin{bmatrix} I_{xx} & I_{xy} & I_{xz} \\ I_{yx} & I_{yy} & I_{yz} \\ I_{zx} & I_{zy} & I_{zz} \end{bmatrix} \quad (3-29)$$

Para obtener las matrices de cada uno de los eslabones se utilizó el software Autodesk Inventor, usando el modelo CAD¹⁰ implementado para la impresión 3D y proporcionando los datos empíricos del peso, detallados en la Tabla 12, para cada eslabón y motor correspondiente, de modo que se obtuvo los momentos de Inercia con respecto eje de rotación propio de cada elemento del torso robótico:

Tabla 13
Momentos de inercia para todos los eslabones.

	Ixx (kg mm ²)	Iyy (kg mm ²)	Izz (kg mm ²)	Ixy (kg mm ²)	Ixz (kg mm ²)	Iyz (kg mm ²)
Torso superior	63139.851	49115.506	28690.784	3.966	-	0.378
Eslabón 1 + Motor 2	1194.836	1204.022	129.31	-0.057	1599.132	19.823
Eslabón 2 + Motor 3	4004.889	649.71	3615.453	235.213	-0.821	-124.799
Eslabón 3 + Motor 4	7389.524	7371.717	83.833	-0.003	0.073	388.979
Eslabón 4 + Motor 5	672.692	63.69	638.052	2.13	-0.28	69.457
Eslabón 5 + Motor 6	1999.349	1971.153	51.729	0	0	-238.296
Eslabón 6 + Motor 7	336.287	35.73	316.687	0	0	49.182
Eslabón 7 + Motor 8	1173.66	1148.006	37.456	0	0	-132.086

¹⁰ CAD: siglas para el Diseño Asistido por Computador, del inglés Computer-Aided Design.

Así mismo se obtuvo las coordenadas de los centros de gravedad de cada eslabón:

Tabla 14

Coordenadas de los centros de gravedad para todos los eslabones

	X (mm)	Y (mm)	Z (mm)
Torso superior	3.236	0	578.67
Eslabón 1 + Motor 2	0	-0.986	53.455
Eslabón 2 + Motor 3	-3.86	74.46	5.28
Eslabón 3 + Motor 4	0	-11	206.32
Eslabón 4 + Motor 5	0.205	-63.57	11.73
Eslabón 5 + motor 6	0	16.99	139.42
Eslabón 6 + motor 7	0	51.33	-5.85
Eslabón 7 + motor 8	0	11.64	100.628

Los centros de gravedad vienen dados en función del eje coordenado de la pieza en el programa Autodesk Inventor, por lo que necesitan ser convertidos a coordenadas globales en el sistema del robot, para esto se puede utilizar la matriz homogénea, multiplicándola por el vector de coordenadas del centro de gravedad de la forma:

$$\mathbf{r}_i = H_i^0 * \mathbf{cg}_i \quad (3-30)$$

En base a estos datos se pudo implementar un algoritmo que obtenga la ecuación que describe la energía cinética del robot para cualquier combinación de variables angulares posibles.

Algoritmo 3.2. Obtención de la ecuación para la energía cinética total del manipulador:

1. *Obtener la matriz de coordenadas globales para los centros de gravedad de cada eslabón utilizando la fórmula (3-30)*
2. *Calcular la matriz tridimensional J_{wc} correspondiente a las velocidades angulares para cada eslabón, tomando directamente las velocidades angulares que forman parte de la matriz del Jacobiano.*

3. Calcular, usando una variación del método geométrico del Jacobiano, la matriz tridimensional Jvc correspondiente a las velocidades angulares en los centros de gravedad de cada eslabón.

$$Jvc_i = J\omega c_i \times (r_i - T_i^0) \quad (3-31)$$

4. Cargar la matriz tridimensional con los momentos de inercia de cada eslabón.
5. Calcular la matriz de velocidades lineales multiplicando cada elemento de la matriz Jvc con un vector de velocidades angulares simbólicas.

$$v_{cg} = Jvc(q)\dot{q} \quad (3-32)$$

6. Calcular la matriz de velocidades angulares multiplicando cada elemento de la matriz $J\omega c$ con un vector de velocidades angulares simbólicas.

$$\omega_{cg} = J\omega c(q)\dot{q} \quad (3-33)$$

7. Cargar el vector de masas de cada eslabón.
8. Inicializar una variable KE donde se irá añadiendo de forma iterativa la componente simbólica de la energía de cada eslabón.
9. Calcular la energía cinética basándose en la fórmula (3-28) y añadirla a la variable acumulativa KE .

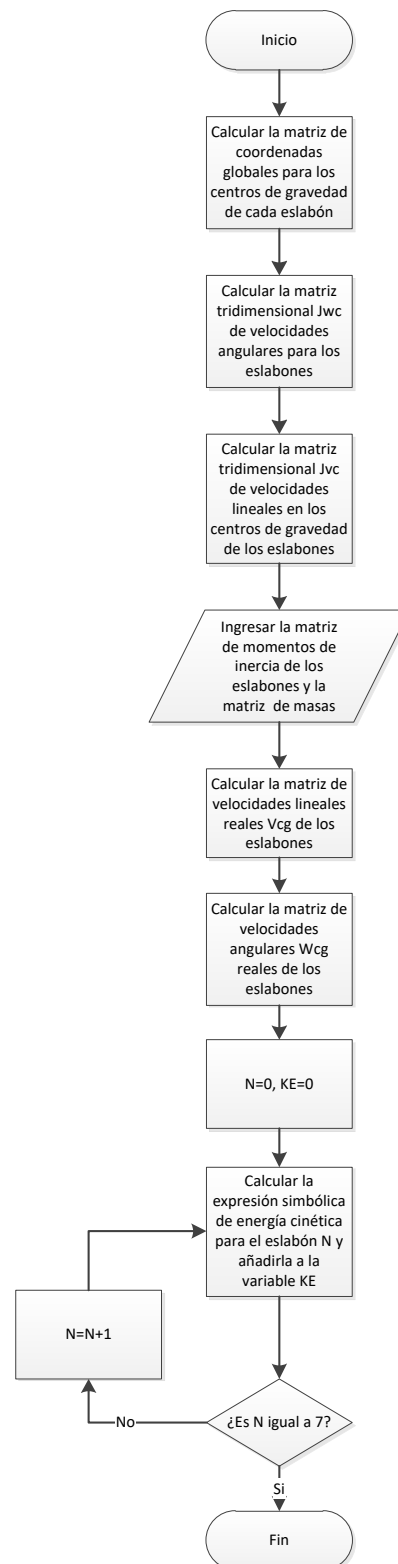


Figura 28. Flujograma del algoritmo 3.2

Una vez obtenida la ecuación del Lagrangiano se procede a aplicarla en la fórmula (3-25) con el fin de despejar el torque en la articulación de interés, que en este caso vendría a ser el de la junta cero, correspondiente al grado de libertad de la cintura. Para realizar esto se deriva el Lagrangiano con respecto, a q_0 , \dot{q}_0 y t ; sin embargo, en la ecuación restante todavía se tendrían componentes simbólicas de velocidades y aceleraciones angulares por lo que definimos estos valores como los máximos de los actuadores con el fin de que el torque obtenido sea el máximo para el desempeño dinámico del manipulador. Una vez obtenido este modelo dinámico se procede a realizar una simulación de todos los movimientos posibles del mismo, guardando un registro del torque máximo calculado para cada instancia, el algoritmo implementado para realizar dicho cálculo se describe a continuación:

Algoritmo 3.3. Obtención del torque máximo requerido para la articulación cero.

1. *Inicializar todas las variables articulares en 0 grados (posición Home).*
2. *Inicializar la variable torque máximo con valor 0 Nm.*
3. *Calcular el torque para la configuración actual.*
4. *Si el valor calculado excede el valor de torque máximo, guardar dicho valor en la variable.*
5. *Mientras el valor de q_7 sea menor que 180° , aumentar su valor en 30° y regresar al paso 3.*
6. *Mientras el valor de q_6 sea menor que 180° , aumentar su valor en 30° , encerrar la variable q_7 y regresar al paso 3.*
7. *Mientras el valor de q_5 sea menor que 180° , aumentar su valor en 30° , encerrar la variable q_6 y regresar al paso 3.*
8. *Mientras el valor de q_4 sea menor que 180° , aumentar su valor en 30° , encerrar la variable q_5 y regresar al paso 3.*
9. *Mientras el valor de q_3 sea menor que 180° , aumentar su valor en 30° , encerrar la variable q_4 y regresar al paso 3.*
10. *Mientras el valor de q_2 sea menor que 180° , aumentar su valor en 30° , encerrar la variable q_3 y regresar al paso 3.*
11. *Mientras el valor de q_1 sea menor que 180° , aumentar su valor en 30° , encerrar la variable q_2 y regresar al paso 3.*

12. Mientras el valor de q_0 sea menor que 180° , aumentar su valor en 30° , encerrar la variable q_1 y regresar al paso 3.

13. Imprimir el valor de torque máximo.

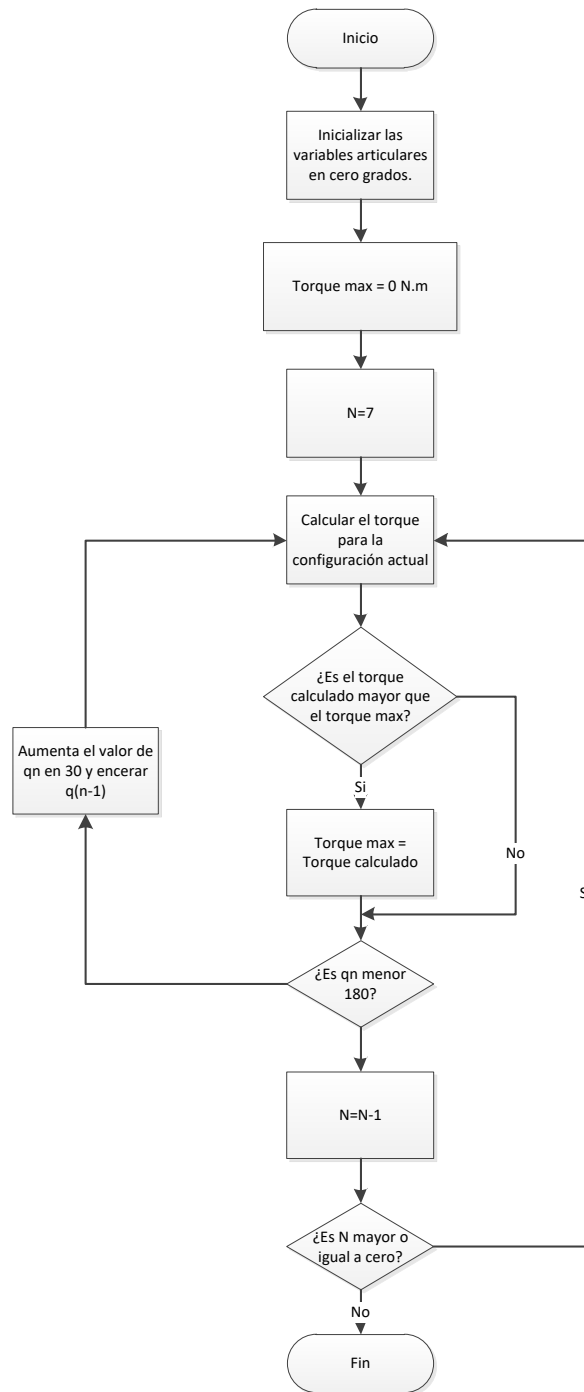


Figura 29. Flujograma del algoritmo 3.3

En base al algoritmo 3.3 se obtuvo que el torque máximo requerido para la junta es de 16.95 Nm por brazo, totalizando 33.9 Nm para toda la articulación de la cintura. En base a esto se escogió el motor Dynamixel MX-64T para trabajar a 14 V proveyendo 7.3 Nm y ser acoplado con una transmisión que provea la ventaja mecánica necesaria para cumplir los requerimientos.

Diseño de la transmisión:

El propósito de un mecanismo de transmisión es transferir energía mecánica desde una fuente hasta una carga (Siciliano Bruno, 2016), en este caso específico se buscó transferir el torque producido por un servomotor hacia la parte superior del torso del robot. En robótica, la selección del mecanismo de transmisión de una junta considera: el tipo de movimiento, la carga, los requerimientos energéticos y la ubicación de actuador con respecto al eslabón; así mismo, el diseño de la transmisión se realiza en base a la robustez, eficiencia y costo preestablecidos.

Existen innumerables tipos de mecanismos de transmisión, sin embargo, en la Tabla 15 se caracterizan los que fueron considerados en el diseño de esta junta en específico.

Tabla 15

Evaluación de los diferentes tipos de transmisiones para la junta.

TIPO	DESCRIPCIÓN	VENTAJAS	DESVENTAJAS
Transmisión directa	El actuador está directamente acoplado al eslabón.	- Simplicidad. - Minimización de juego mecánico.	No proporciona ventaja mecánica al actuador.
Transmisión de cinta, cadena o correa	Un elemento elástico es colocado entre el actuador y el eslabón a través de un juego de poleas.	- Libertad para ubicar la masa del actuador. - Posibilidad de proporcionar ventaja mecánica.	- Poco robusto - Pérdida de fluidez del movimiento. - Alto mantenimiento.
Engranajes	El actuador y el eslabón se unen a través de elementos rígidos dentados.	- Confiable. - Bajo mantenimiento. - Versatilidad de diseño.	La eficiencia y exactitud dependen de la precisión en la manufactura.

Fuente: (Siciliano Bruno, 2016).

La transmisión directa queda descartada debido a que el motor escogido no posee el torque necesario para la junta, por lo que las opciones de diseño se limitan a una transmisión por cadena o engranes, teniendo en cuenta el reducido espacio en el que debe ser implementado el mecanismo, se descarta la transmisión por cadena y se opta por el juego de engranes, escogiendo los del tipo helicoidal, ya que ofrecen mejores prestaciones en cuanto a minimización del juego mecánico, exactitud y aprovechamiento del espacio.

Diseño de engranes helicoidales:

Se impone una distancia entre centros de los engranes de 44.5 mm ya que es la máxima posible dentro del cilindro vertical que compone el torso inferior. Teniendo en cuenta el máximo aprovechamiento del espacio disponible, se impone un número de dientes para el piñón igual a 20 ya que es el mínimo requerido para un trabajo sin interferencia (Norton, 2014). Comenzamos el cálculo para obtener la relación de transmisión máxima posible C en base a la distancia entre centros impuesta y los diámetros primitivos del engrane piñón dp_p y el engranaje rueda Dp_r :

$$Dp_r + dp_p = 89 \quad (3-34)$$

$$c * dp_p + dp_p = 89 \quad (3-35)$$

$$dp_p(c + 1) = 89 \quad (3-36)$$

$$\frac{m_n Z_p}{\cos(\varphi)} (c + 1) = 89 \quad (3-37)$$

De acuerdo a la disponibilidad de la herramienta para la fabricación de los engranes se impone un módulo normal m_n de 1,5 así mismo un ángulo de hélice φ igual a 19° . Con esto la ecuación (3-37) queda:

$$\frac{1.5 * 20}{\cos(19)} (c + 1) = 89 \quad (3-38)$$

Lo cual se despeja en una relación de transmisión $C = 1.805$

En base a esto se obtiene un juego de engranes con las siguientes características:

Tabla 16

Características para los engranes helicoidales de la transmisión.

	PIÑÓN	RUEDA
Z	20	36
Di	28 mm	53.46 mm
Dp	31.79 mm	57.21 mm
De	34.79 mm	60.21 mm
Pcf	5.99	5.99
Pax	17.1	17.1
B	20 mm	20 mm

Se necesita escoger un material para la manufactura del juego de engranes, para esto se opta como primera opción el aluminio 7020, con un límite a la rotura de 350 MPa. Para validar esta decisión se utiliza el asistente de diseño nativo del software Autodesk Inventor, cuyo resultado se puede apreciar en la *Figura 30*.

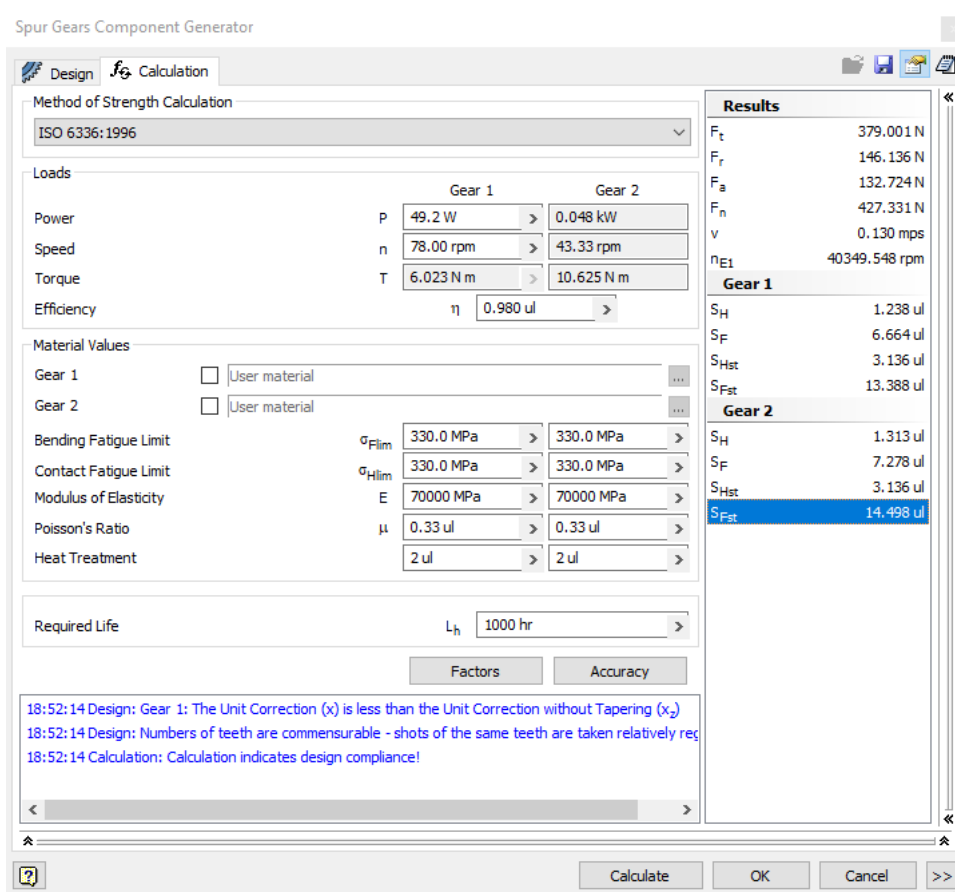


Figura 30. Ventana de resultados del asistente de diseño de engranes de Autodesk Inventor.

En base a este análisis se puede validar el diseño, teniendo en cuenta que ninguno de los factores de seguridad obtenidos sea menor que 1, tal como se detalla en la Tabla 17.

Tabla 17
Factores de diseño para el trabajo de los engranes.

FACTOR DE SEGURIDAD	PIÑÓN	RUEDA
Para el picado	1.238	1.313
Para la rotura	6.664	7.278
Para el contacto estático	3.136	3.136
Para el doblez	13.388	14.49

Diseño del eje de transmisión:

Sobre el diseño tentativo de la estructura se realizó un análisis de elementos finitos dividiendo las cargas en:

- **Momentos torsores:** Torque obtenido en el estudio del Lagrangiano.
- **Cargas axiales:** Peso de la estructura y las cargas generadas por el funcionamiento de los engranes helicoidales.

Se obtuvieron resultados que validan el diseño mecánico tentativo, obteniendo un esfuerzo de Von Mises máximo de 0.1 MPa ubicados en los pernos que conectan el bocín con la tapa del torso superior, tal como se puede apreciar en la *Figura 31*.

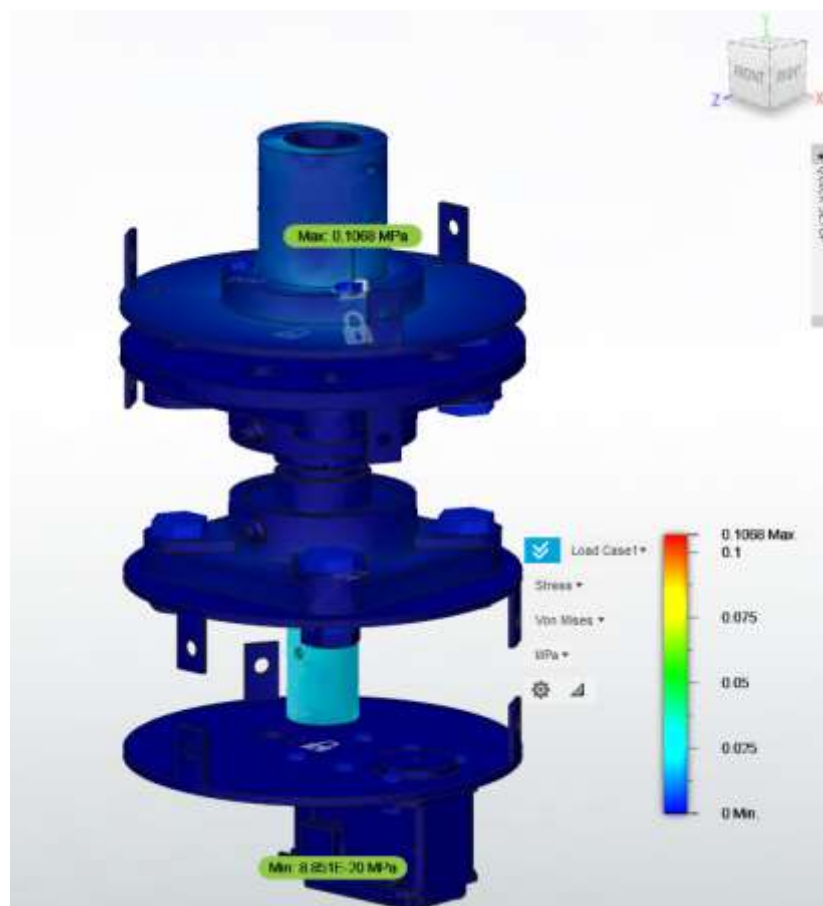


Figura 31. Análisis de elementos finitos para la articulación de la cintura realizado en el software Autodesk Fusion 360.

3.4. DESARROLLO DE LA TELEOPERACIÓN MEDIANTE ESQUELETIZACIÓN

El desarrollo de las técnicas de teleoperación, tanto mediante esqueletización como con sensores inerciales, se realizó tomando como referencia la orientación de cada una de las partes del brazo del usuario para simular de la forma más natural posible los movimientos humanos. En otras palabras, no se pretende controlar la posición del TCP sino la disposición angular de cada eslabón del brazo robótico.

Se utilizó el sensor Kinect para obtener las coordenadas de los puntos clave del cuerpo humano para la esqueletización. La Figura 32 indica los puntos clave o articulaciones que son detectados por la versión 2 del sensor Kinect, la cual fue seleccionada principalmente porque detecta 5 puntos más que la primera versión de este sensor, entre los cuales se encuentran el dedo índice y el pulgar de cada mano, datos que serán utilizados para determinar la apertura del gripper ubicado como efector final de cada brazo del torso robótico.

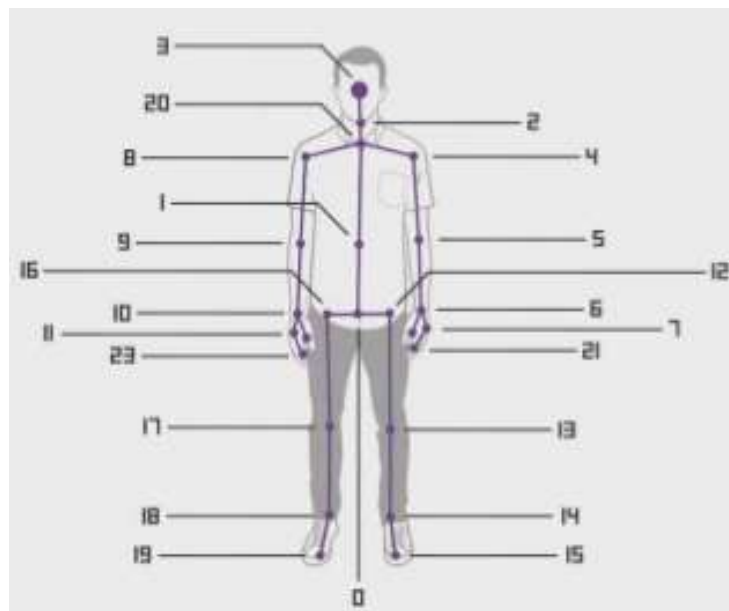


Figura 32. Puntos clave del cuerpo detectados por el Kinect V2.
Fuente: (Morkar, 2017).

Mediante el Kinect SDK, se obtienen las coordenadas rectangulares $\mathbf{P}_i = [x_i, y_i, z_i]$ de cada uno de estos puntos clave con respecto al sistema de coordenadas globales propio del sensor Kinect. La disposición de los ejes coordenados del Kinect se detalla en la Figura 33.

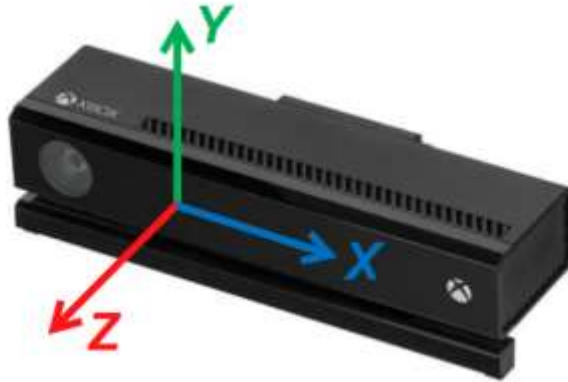


Figura 33. Origen del sistema de coordenadas globales en el Kinect V2.

Fuente: (Microsoft, 2018).

A partir de las coordenadas del hombro, codo, muñeca y mano, se calculan secuencialmente cada uno de los ángulos correspondientes a las variables articulares del torso robótico en base a la aplicación del cambio de sistemas coordenados mediante la matriz de transformación homogénea H_i^{i-1} y cálculos trigonométricos. Se empieza calculando el ángulo de la cintura para proceder a calcular los ángulos de las articulaciones de los brazos.

3.4.1. Cálculo del ángulo del grado de libertad correspondiente a la cintura

El ángulo de giro para la articulación de la cintura se calcula únicamente a partir de la posición relativa entre el hombro izquierdo $\mathbf{P}_4 = [x_4, y_4, z_4]$ y el hombro derecho $\mathbf{P}_8 = [x_8, y_8, z_8]$ del usuario.

$$q_0 = \tan^{-1} \left(\frac{z_4 - z_8}{x_8 - x_4} \right) \quad (3-39)$$

Una vez conocido el valor de q_0 se pueden calcular los ángulos para las variables angulares de los brazos.

3.4.2. Cálculo de los ángulos para el brazo izquierdo

Los ángulos de las variables articulares del brazo izquierdo están representados por las variables $q_1, q_2, q_3, q_4, q_5, q_6, q_7$. Estos valores deben ser calculados secuencialmente ya que cada uno de ellos depende de los anteriores.

Se calculan inicialmente los ángulos correspondientes al hombro (q_1, q_2), los cuales se encuentran en función del ángulo de giro de la cintura q_0 ya calculado previamente, para lo cual obtenemos un nuevo sistema coordenado móvil teniendo en cuenta la transformación previa de los ejes coordenados del Kinect hacia los del robot H_0^{-2} y la rotación producida por q_0, H_1^0 , utilizando los parámetros DH descritos en la Tabla 18.

$$H_1^{-2} = H_0^{-2}H_1^0 = (H_{-1}^{-2}H_0^{-1})H_1^0 \quad (3-40)$$

Tabla 18

Parámetros Denavit-Hartenberg para el cálculo de q_1, q_2

	θ	α	d	a
-2 - -1	0	-90°	0	0
-1 - 0	90°	0°	0	0
0-1	q_0	-90°	0	0

Se puede notar que los desplazamientos d_i y a_i son siempre nulos durante este procedimiento. Esto se debe a que se toman las posiciones relativas P_i^{i-1} de forma que éstas se ven únicamente afectadas por la orientación de las variables articulares previas. En el caso de las variables articulares del hombro (q_1, q_2), se utiliza la posición relativa P_5^4 , donde P_4 es la posición del hombro izquierdo y P_5 es la posición del codo izquierdo.

$$P_5^4 = P_5 - P_4 = \begin{bmatrix} x_5 \\ y_5 \\ z_5 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} x_4 \\ y_4 \\ z_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_5 - x_4 \\ y_5 - y_4 \\ z_5 - z_4 \end{bmatrix} \quad (3-41)$$

La posición relativa \mathbf{P}_5^4 es transformada hacia el nuevo sistema coordenado móvil mediante la ecuación (3-42). Este nuevo vector es llamado \mathbf{P}'_5^4 .

$$\mathbf{P}'_5^4 = [x_5^4 \ y_5^4 \ z_5^4 \ 1] H_1^{-2} = [x'_5{}^4 \ y'_5{}^4 \ z'_5{}^4 \ 1] \quad (3-42)$$

Al utilizar la posición relativa transformada \mathbf{P}'_5^4 se pueden calcular los ángulos q_1, q_2 mediante relaciones trigonométricas simples, como se indica en las ecuaciones (3-43) y (3-44).

$$q_1 = -\text{atan2}(x'_5{}^4, y'_5{}^4) \quad (3-43)$$

$$q_2 = -\sin^{-1} \left(\frac{\sqrt{(x'_5{}^4)^2 + (y'_5{}^4)^2}}{\sqrt{(x'_5{}^4)^2 + (y'_5{}^4)^2 + (z'_5{}^4)^2}} \right) \quad (3-44)$$

De la misma manera procedemos a calcular los ángulos correspondientes al codo (q_3, q_4), los cuales se encuentran en función de q_0, q_1, q_2 . Se utiliza la matriz H_3^{-2} y los parámetros DH descritos en la Tabla 19.

$$H_3^{-2} = H_0^{-2} H_3^0 = (H_1^{-2} H_0^{-1})(H_1^0 H_2^1 H_3^2) \quad (3-45)$$

Tabla 19

Parámetros Denavit-Hartenberg para el cálculo de q_3, q_4

	θ	α	d	a
-2 - -1	0	-90°	0	0
-1 - 0	90°	0°	0	0
0-1	q_0	-90°	0	0
1-2	$q_1 - 90^\circ$	-90°	0	0
2-3	q_2	90°	0	0

Se calcula \mathbf{P}'_6^5 a partir de la posición relativa \mathbf{P}_6^5 , donde \mathbf{P}_5 es la posición del codo izquierdo y \mathbf{P}_6 es la posición de la muñeca izquierda.

$$\mathbf{P}_6^5 = \begin{bmatrix} x_6 - x_5 \\ y_6 - y_5 \\ z_6 - z_5 \end{bmatrix} \quad (3-46)$$

$$\mathbf{P}'_6^5 = [x_6^5 \ y_6^5 \ z_6^5 \ 1] H_3^{-2} \quad (3-47)$$

Ahora se pueden calcular los ángulos q_3, q_4 mediante relaciones trigonométricas simples, como se indica en las ecuaciones (3-48) y (3-49).

$$q_3 = -\text{atan2}(x'_6{}^5, y'_6{}^5) \quad (3-48)$$

$$q_4 = -\sin^{-1} \left(\frac{\sqrt{(x'_6{}^5)^2 + (y'_6{}^5)^2}}{\sqrt{(x'_6{}^5)^2 + (y'_6{}^5)^2 + (z'_6{}^5)^2}} \right) \quad (3-49)$$

A continuación, se calculan los ángulos correspondientes a la muñeca (q_5, q_6), los cuales se encuentran en función de q_0, q_1, q_2, q_3, q_4 . Se utiliza la matriz H_5^{-2} y los parámetros DH descritos en la Tabla 20.

$$H_5^{-2} = H_0^{-2} H_5^0 \quad (3-50)$$

Tabla 20

Parámetros Denavit-Hartenberg para el cálculo de q_5, q_6

	θ	α	d	a
-2 - -1	0	-90°	0	0
-1 - 0	90°	0°	0	0
0-1	q_0	-90°	0	0
1-2	$q_1 - 90^\circ$	-90°	0	0
2-3	q_2	90°	0	0
3-4	$q_3 + 90^\circ$	90°	0	0
4-5	q_4	-90°	0	0

Se calcula \mathbf{P}'_7 a partir de la posición relativa \mathbf{P}_7^6 , donde \mathbf{P}_6 es la posición de la muñeca izquierda y \mathbf{P}_7 es la posición del centro de la mano izquierda.

$$\mathbf{P}_7^6 = \begin{bmatrix} x_7 - x_6 \\ y_7 - y_6 \\ z_7 - z_6 \end{bmatrix} \quad (3-51)$$

$$\mathbf{P}'_7 = [x_7^6 \ y_7^6 \ z_7^6 \ 1] H_5^{-2} \quad (3-52)$$

Ahora se pueden calcular los ángulos q_5, q_6 mediante las relaciones trigonométricas que se indican en (3-53) y (3-54).

$$q_5 = 90^\circ - \text{atan2}(x_7^6, y_7^6) \quad (3-53)$$

$$q_6 = -\sin^{-1} \left(\frac{\sqrt{(x_7^6)^2 + (y_7^6)^2}}{\sqrt{(x_7^6)^2 + (y_7^6)^2 + (z_7^6)^2}} \right) \quad (3-54)$$

Se repite el procedimiento una vez más para calcular la rotación de la mano (q_7), el que depende de $q_0, q_1, q_2, q_3, q_4, q_5, q_6$. Se utiliza la matriz H_7^{-2} y los parámetros DH descritos en la Tabla 21.

$$H_7^{-2} = H_0^{-2} H_7^0 \quad (3-55)$$

Tabla 21

Parámetros Denavit-Hartenberg para el cálculo de q_7

	θ	α	d	a
-2 - -1	0	-90°	0	0
-1 - 0	90°	0°	0	0
0-1	q_0	-90°	0	0
1-2	$q_1 - 90^\circ$	-90°	0	0
2-3	q_2	90°	0	0
3-4	$q_3 + 90^\circ$	90°	0	0
4-5	q_4	-90°	0	0
5-6	q_5	90°	0	0
6-7	q_6	-90°	0	0

Se calcula $\mathbf{P}'_{22}{}^{21}$ a partir de la posición relativa $\mathbf{P}_{22}{}^{21}$, donde \mathbf{P}_{21} es la posición del dedo índice de la mano izquierda y \mathbf{P}_{22} es la posición del pulgar izquierdo.

$$\mathbf{P}_{22}{}^{21} = \begin{bmatrix} x_{22} - x_{21} \\ y_{22} - y_{21} \\ z_{22} - z_{21} \end{bmatrix} \quad (3-56)$$

$$\mathbf{P}'_{22}{}^{21} = [x_{22}{}^{21} \ y_{22}{}^{21} \ z_{22}{}^{21} \ 1] H_7^{-2} \quad (3-57)$$

Ahora se puede calcular q_7 mediante la ecuación (3-58).

$$q_7 = \text{atan2}(x'_{22}{}^{21}, y'_{22}{}^{21}) \quad (3-58)$$

El ángulo del motor que determina el grado de apertura del gripper, llamado q_8 (a pesar de que pertenece al efector final y no es considerado como un grado de libertad en la configuración del torso robótico), es calculado mediante una relación directamente proporcional a la distancia entre los dedos índice y pulgar de la mano izquierda del usuario, según (3-59).

$$q_8 = \left(\sqrt{(x'_{22}{}^{21})^2 + (y'_{22}{}^{21})^2} - 50 \right) * 28 - 150 \quad (3-59)$$

3.4.3. Cálculo de los ángulos para el brazo derecho

Los ángulos de las variables articulares del brazo derecho están representados por las variables $q_{11}, q_{12}, q_{13}, q_{14}, q_{15}, q_{16}, q_{17}$. Estos valores son calculados mediante el mismo procedimiento realizado para obtener las variables articulares del brazo izquierdo, con ciertas variaciones que se detallan a continuación en esta sección.

Se calculan los ángulos q_{11}, q_{12} , utilizando la matriz H_1^{-2} y los parámetros DH descritos en la Tabla 22.

$$H_1^{-2} = H_0^{-2} H_1^0 = (H_1^{-2} H_0^{-1}) H_1^0 \quad (3-60)$$

Tabla 22*Parámetros Denavit-Hartenberg para el cálculo de q_{11}, q_{12}*

	θ	α	d	a
-2 - -1	0	-90°	0	0
-1 - 0	90°	0°	0	0
0-1	q_0	-90°	0	0

Se calcula P'_9 a partir de la posición relativa P_9^8 , donde P_8 es la posición del hombro derecho y P_9 es la posición del codo derecho.

$$P_9^8 = \begin{bmatrix} x_9 - x_8 \\ y_9 - y_8 \\ z_9 - z_8 \end{bmatrix} \quad (3-61)$$

$$P_9^8 = [x_9^8 \ y_9^8 \ z_9^8 \ 1] H_1^{-2} \quad (3-62)$$

Ahora se pueden calcular los ángulos q_{11}, q_{12} mediante relaciones trigonométricas (3-63) y (3-64).

$$q_{11} = \text{atan2}(x'_9, y'_9) \quad (3-63)$$

$$q_{12} = \sin^{-1} \left(\frac{\sqrt{(x'_9)^2 + (y'_9)^2}}{\sqrt{(x'_9)^2 + (y'_9)^2 + (z'_9)^2}} \right) \quad (3-64)$$

De la misma manera procedemos a calcular los ángulos correspondientes al codo (q_{13}, q_{14}). Se utiliza la matriz H_3^{-2} y los parámetros DH descritos en la Tabla 23.

$$H_3^{-2} = H_0^{-2} H_3^0 \quad (3-65)$$

Tabla 23*Parámetros Denavit-Hartenberg para el cálculo de q_{13}, q_{14}*

	θ	α	d	a
-2 - -1	0	-90°	0	0
-1 - 0	90°	0°	0	0
0-1	q_0	90°	0	0
1-2	$q_{11} - 90^\circ$	-90°	0	0
2-3	q_{12}	90°	0	0

Se calcula $P'_{10}{}^9$ a partir de la posición relativa P_{10}^9 , donde P_9 es la posición del codo derecho y P_{10} es la posición de la muñeca derecha.

$$P_{10}^9 = \begin{bmatrix} x_{10} - x_9 \\ y_{10} - y_9 \\ z_{10} - z_9 \end{bmatrix} \quad (3-66)$$

$$P'_{10}{}^9 = [x'_{10} \ y'_{10} \ z'_{10} \ 1] H_3^{-2} \quad (3-67)$$

Ahora se pueden calcular los ángulos q_{13}, q_{14} mediante relaciones trigonométricas (3-68) y (3-69).

$$q_{13} = \text{atan2}(x'_{10}, y'_{10}) \quad (3-68)$$

$$q_{14} = \sin^{-1} \left(\frac{\sqrt{(x'_{10})^2 + (y'_{10})^2}}{\sqrt{(x'_{10})^2 + (y'_{10})^2 + (z'_{10})^2}} \right) \quad (3-69)$$

A continuación, se calculan los ángulos correspondientes a la muñeca (q_{15}, q_{16}). Se utiliza la matriz H_5^{-2} y los parámetros DH descritos en la Tabla 24.

$$H_5^{-2} = H_0^{-2} H_5^0 \quad (3-70)$$

Tabla 24

Parámetros Denavit-Hartenberg para el cálculo de q_{15}, q_{16}

	θ	α	d	a
-2 - -1	0	-90°	0	0
-1 - 0	90°	0°	0	0
0-1	q_0	90°	0	0
1-2	$q_{11} - 90^\circ$	-90°	0	0
2-3	q_{12}	90°	0	0
3-4	$q_{13} + 90^\circ$	-90°	0	0
4-5	q_{14}	90°	0	0

Se calcula P'_{11}^{10} a partir de la posición relativa P_{11}^{10} , donde P_{10} es la posición de la muñeca derecha y P_{11} es la posición del centro de la mano derecha.

$$P'_{11}^{10} = \begin{bmatrix} x_{11} - x_{10} \\ y_{11} - y_{10} \\ z_{11} - z_{10} \end{bmatrix} \quad (3-71)$$

$$P'_{11}^{10} = [x_{11}^{10} \ y_{11}^{10} \ z_{11}^{10} \ 1] H_5^{-2} \quad (3-72)$$

Ahora se pueden calcular los ángulos q_{15}, q_{16} mediante las relaciones trigonométricas (3-73) y (3-74).

$$q_{15} = 90^\circ - \text{atan2}(x'_{11}^{10}, y'_{11}^{10}) \quad (3-73)$$

$$q_{16} = \sin^{-1} \left(\frac{\sqrt{(x'_{11}^{10})^2 + (y'_{11}^{10})^2}}{\sqrt{(x'_{11}^{10})^2 + (y'_{11}^{10})^2 + (z'_{11}^{10})^2}} \right) \quad (3-74)$$

Se repite el procedimiento una vez más para calcular la rotación de la mano (q_7). Se utiliza la matriz H_7^{-2} y los parámetros DH descritos en la Tabla 25.

$$H_7^{-2} = H_0^{-2} H_7^0 \quad (3-75)$$

Tabla 25
Parámetros Denavit-Hartenberg para el cálculo de q_{17}

	θ	α	d	a
-2 - -1	0	-90°	0	0
-1 - 0	90°	0°	0	0
0-1	q_0	90°	0	0
1-2	$q_{11} - 90^\circ$	-90°	0	0
2-3	q_{12}	90°	0	0
3-4	$q_{13} + 90^\circ$	-90°	0	0
4-5	q_{14}	90°	0	0
5-6	q_{15}	-90°	0	0
6-7	q_{16}	-90°	0	0

Se calcula $P'_{24}{}^{23}$ a partir de la posición relativa $P_{24}{}^{23}$, donde P_{23} es la posición del dedo índice de la mano derecha y P_{24} es la posición del pulgar derecho.

$$P_{24}{}^{23} = \begin{bmatrix} x_{24} - x_{23} \\ y_{24} - y_{23} \\ z_{24} - z_{23} \end{bmatrix} \quad (3-76)$$

$$P'_{24}{}^{23} = [x_{24}{}^{23} \ y_{24}{}^{23} \ z_{24}{}^{23} \ 1] H_7^{-2} \quad (3-77)$$

Ahora se puede calcular q_{17} mediante la ecuación (3-78).

$$q_{17} = -\text{atan2}(x'_{24}{}^{23}, y'_{24}{}^{23}) \quad (3-78)$$

Finalmente se calcula el ángulo del motor que determina el grado de apertura del gripper derecho q_{18} según (3-79).

$$q_{18} = \left(\sqrt{(x'_{24}{}^{23})^2 + (y'_{24}{}^{23})^2} - 50 \right) * 28 - 150 \quad (3-79)$$

Los ángulos q_i son obtenidos continuamente en cada lectura de los datos del sensor Kinect y enviados hacia los servomotores para que el torso robótico adopte la pose del usuario y realice el seguimiento de sus movimientos.

3.5. DESARROLLO DE LA TELEOPERACIÓN EN BASE A SENSORES INERCIALES

El desarrollo de la teleoperación en base a sensores inerciales se realizó utilizando 7 módulos GY-521, dicho módulo contiene una unidad de medición inercial MPU-5060. La cual a su vez posee 3 acelerómetros y 3 giroscopios ortogonales, que conforman un sistema de medición de 6 grados de libertad. La esquemática del sensor se puede apreciar en la Figura 34:

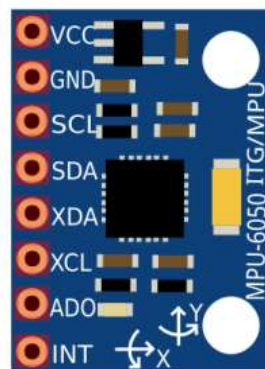


Figura 34. Módulo GY-521.
Fuente: (Minibots, 2015).

Para conectar dichos sensores se creó una red de comunicación serial I2C utilizando los puertos SCL y SDA de cada módulo. Como se puede apreciar en la Figura 35, la localización de cada sensor se realizó mediante bandas elásticas acopladas a los tres primeros eslabones de las extremidades superiores y al torso del operador. La transmisión de datos se implementó mediante la utilización de cable cinta y conectores IDC, con el fin de tener un arreglo ordenado de sensores que midan y transmitan la información de la forma más fidedigna posible.

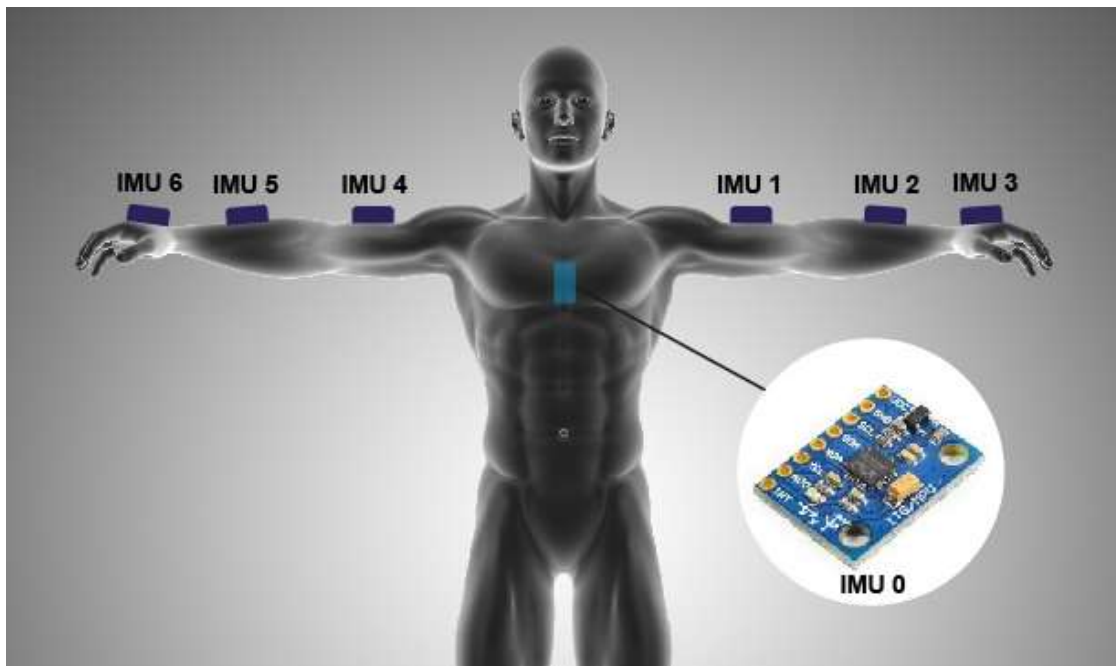


Figura 35. Esquema de localización de sensores inerciales en el teleoperador.

Para la adquisición de datos se utilizó una placa Arduino Uno, haciendo uso de sus pines SDA y SCL y además de 7 salidas digitales utilizadas como selectores para la transmisión de datos de cada uno de los módulos.

En cuanto al filtrado de la señal, se utilizó un filtro de media móvil el cual filtra la señal creando una serie de promedios de diferentes subconjuntos de la muestra de datos, se lo considera un filtro pasa bajos que reduce el ruido aleatorio conservando el tiempo de respuesta de la señal. Como su nombre lo indica, el filtro opera sacando un promedio de un número de datos de la señal de entrada para obtener un dato único de la señal de salida y, en forma de ecuación, se escribiría de la siguiente manera (Analog Devices, 2018):

$$y[i] = \frac{1}{M} \sum_{j=0}^{M-1} x[i + j] \quad (3-80)$$

Cabe recalcar que mientras mayor sea el número de datos promediado se obtiene un mejor filtrado del ruido, sin embargo se compromete el tiempo de respuesta de la señal, por lo que es recomendable que dicho número se obtenga empíricamente, observando el mejor resultado de acuerdo a la aplicación.

Así mismo se implementó un algoritmo para la adquisición, y envío de datos a Matlab desde el entorno de desarrollo integrado de Arduino, el mismo se detalla a continuación:

Algoritmo 3.4. Algoritmo de adquisición, filtrado y envío de datos.

1. *Incluir la librería “MPU6050.h” e “I2Cdev.h”.*
2. *Crear una instancia de la librería MPU llamada “accelgyro”.*
3. *Inicializar 7 pines GPIO como salidas digitales, de modo que trabajen como selectores para la lectura de los sensores.*
4. *Poner en bajo la salida digital correspondiente al pin de lectura del IMU 0.*
5. *Inicializar el sensor con el comando “accelgyro.initialize()”.*
6. *Realizar un testeo de conexión utilizando el comando “accelgyro.testConnection()”.*
7. *Configurar las compensaciones de los giroscopios del sensor.*
8. *Configurar la escala para los acelerómetros para los giroscopios.*
9. *Repetir desde el paso 4 para los 6 sensores restantes.*
10. *Poner en bajo la salida digital correspondiente al pin de lectura del IMU 0.*
11. *Obtener los datos de los giroscopio en el eje X utilizando el comando “accelgyro.getRotation(&Dgx)”.*
12. *Transformar el valor obtenido en datos reales dividiéndolo para 16.4.*
13. *Introducir el valor obtenido en el filtro de media móvil.*
14. *Integrar los datos obtenidos del filtro correspondientes a velocidad angular, de modo que sean transformados en ángulo de guiñado ψ del torso del operador.*

$$Ang = Ang + Dgx * dt \quad (3-81)$$

Donde dt se calibra empíricamente teniendo en cuenta el ciclo fetch del procesador y el tamaño del programa.

15. *Poner en bajo la salida digital correspondiente al pin de lectura del IMU 1.*
16. *Obtener los datos del giroscopio en el eje Z.*
17. *Transformar el dato en un valor real.*
18. *Introducir el dato en el filtro de media móvil.*

19. *Integrar la salida del filtro de modo que se obtenga el ángulo de guiñada de la extremidad del operador.*
20. *Obtener los datos de los 3 acelerómetros del sensor utilizando el comando “accelgyro.getAcceleration(&Dax, &Day, &Daz)”*
21. *Introducir los tres datos en sus respectivos filtros.*
22. *Calcular el ángulo de cabeceo θ utilizando la fórmula:*

$$\text{Pitch} = \text{atan}\left(\frac{ax}{\sqrt{ay^2 + az^2}}\right) \quad (3-82)$$

23. *Calcular el ángulo de alabeo ϕ utilizando la fórmula:*

$$\text{Roll} = \text{atan}\left(\frac{ay}{\sqrt{ax^2 + az^2}}\right) \quad (3-83)$$

24. *Repetir desde el paso 15 para los 5 sensores restantes.*
25. *Imprimir de forma serial los ángulos obtenidos.*

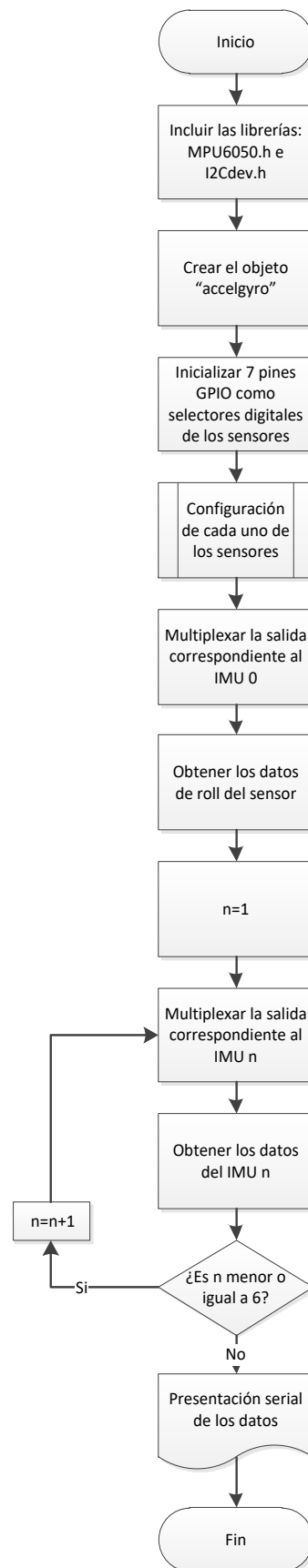


Figura 36. Flujograma para el algoritmo 3.4

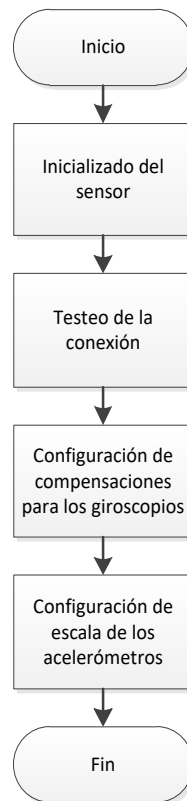


Figura 37. Subproceso “Configuración de sensor IMU”

3.5.1. Cálculo del ángulo del grado de libertad correspondiente a la cintura

El ángulo de giro para la articulación de la cintura se relaciona directamente con el ángulo ψ_0 recibido de los sensores inerciales

$$q_0 = \psi_0 \quad (3-84)$$

Una vez conocido el valor de q_0 se pueden calcular los ángulos para las variables angulares de los brazos.

3.5.2. Cálculo de los ángulos para el brazo izquierdo

A partir de los ángulos de orientación θ_i, ψ_i, ϕ_i enviados por el Arduino, se calculan las coordenadas de cada uno de los puntos clave del cuerpo respecto al centro de la cintura, las cuales se asemejarán a las coordenadas obtenidas por el sensor Kinect en la

técnica de esqueletización. Los puntos P_4, P_5, P_6, P_7 corresponden al hombro, codo, muñeca, y mano del brazo izquierdo, respectivamente; y se calculan mediante las ecuaciones (3-85) a (3-96), tomando las longitudes especificadas en la Tabla 5.

$$x_4 = (L_0 + L_1) \sin \psi_0 \quad (3-85)$$

$$y_4 = (L_0 + L_1) \cos \psi_0 \quad (3-86)$$

$$z_4 = h \quad (3-87)$$

$$x_5 = x_4 + L_2 \cos \theta_1 \sin \psi_1 \quad (3-88)$$

$$y_5 = y_4 + L_2 \cos \theta_1 \cos \psi_1 \quad (3-89)$$

$$z_5 = z_4 + L_2 \sin \theta_1 \quad (3-90)$$

$$x_6 = x_5 + L_3 \cos \theta_2 \sin \psi_2 \quad (3-91)$$

$$y_6 = y_5 + L_3 \cos \theta_2 \cos \psi_2 \quad (3-92)$$

$$z_6 = z_5 + L_3 \sin \theta_2 \quad (3-93)$$

$$x_7 = x_6 + L_4 \cos \theta_3 \sin \psi_3 \quad (3-94)$$

$$y_7 = y_6 + L_4 \cos \theta_3 \cos \psi_3 \quad (3-95)$$

$$z_7 = z_6 + L_4 \sin \theta_3 \quad (3-96)$$

Utilizando estos puntos P_4, P_5, P_6, P_7 , se obtienen los ángulos $q_1, q_2, q_3, q_4, q_5, q_6$ mediante el mismo procedimiento descrito en la sección 3.4.2 pero sin realizar la transformación de coordenadas previas H_0^{-2} .

3.5.3. Cálculo de los ángulos del brazo derecho

De manera similar que para el brazo izquierdo, a partir de los ángulos de orientación θ_i, ψ_i, ϕ_i enviados por el Arduino, se calculan los puntos P_8, P_9, P_{10}, P_{11}

corresponden al hombro, codo, muñeca, y mano del brazo derecho, respectivamente, mediante las ecuaciones (3-97) a (3-108), tomando las longitudes especificadas en la Tabla 5.

$$x_8 = (L_0 + L_1) \sin \psi_0 \quad (3-97)$$

$$y_8 = -(L_0 + L_1) \cos \psi_0 \quad (3-98)$$

$$z_8 = h \quad (3-99)$$

$$x_9 = x_8 + L_2 \cos \theta_4 \sin \psi_4 \quad (3-100)$$

$$y_9 = y_8 - L_2 \cos \theta_4 \cos \psi_4 \quad (3-101)$$

$$z_9 = z_8 + L_2 \sin \theta_4 \quad (3-102)$$

$$x_{10} = x_9 + L_3 \cos \theta_5 \sin \psi_5 \quad (3-103)$$

$$y_{10} = y_9 - L_3 \cos \theta_5 \cos \psi_5 \quad (3-104)$$

$$z_{10} = z_9 + L_3 \sin \theta_5 \quad (3-105)$$

$$x_{11} = x_{10} + L_4 \cos \theta_6 \sin \psi_6 \quad (3-106)$$

$$y_{11} = y_{10} - L_4 \cos \theta_6 \cos \psi_6 \quad (3-107)$$

$$z_{11} = z_{10} + L_4 \sin \theta_6 \quad (3-108)$$

Utilizando estos puntos $\mathbf{P}_8, \mathbf{P}_9, \mathbf{P}_{10}, \mathbf{P}_{11}$, se obtienen los ángulos $q_{11}, q_{12}, q_{13}, q_{14}, q_{15}, q_{16}$ mediante el mismo procedimiento descrito en la sección 3.4.3 sin realizar la transformación de coordenadas previas H_0^{-2} .

Los ángulos q_i son obtenidos continuamente en cada lectura de los datos recibidos desde el Arduino y enviados hacia los servomotores para que el torso robótico adopte la pose del usuario y realice el seguimiento de sus movimientos.

CAPÍTULO IV

PRUEBAS Y RESULTADOS

El capítulo describe el protocolo experimental realizado durante las pruebas de teleoperación, tanto mediante la técnica de esqueletización como con sensores inerciales, y los resultados obtenidos de cada prueba. Los parámetros analizados para realizar la comparación entre ambas técnicas fueron exactitud, repetibilidad y tiempo de estabilización, en base a la norma ISO 9283 (ISO, 1998).

4.1. PROTOCOLO EXPERIMENTAL

Las pruebas y toma de datos para las dos técnicas analizadas se llevaron a cabo mediante un mismo procedimiento y dentro del mismo ambiente de trabajo, es decir, bajo condiciones poco variantes de luminosidad, temperatura y humedad relativa. La fecha de las pruebas fue el 1 de octubre de 2018, entre las 10h00 y 18h00, horario en el cual la temperatura ambiental se encuentra entre 18°C y 24°C (Weather Spark, 2018).

4.1.1. Pruebas de exactitud

La exactitud expresa la desviación entre la posición deseada $\mathbf{P}_c = [x_c, y_c, z_c]$ y la media de las posiciones alcanzadas $\bar{\mathbf{P}} = [\bar{x}, \bar{y}, \bar{z}]$ cuando el manipulador robótico se acerca al punto deseado desde una misma dirección (ISO, 1998).

De acuerdo a la norma ISO 9283, se realizaron $n = 30$ repeticiones para cada una de las 5 poses de prueba seleccionadas, distribuidas en tres poses para el brazo izquierdo (hacia adelante, horizontal, hacia arriba) y dos para el brazo derecho (horizontal, hacia arriba). Para ejecutar cada una de estas poses de prueba previamente definidas, el usuario se colocó inicialmente parado firme con la mirada hacia adelante y los pies dentro de las marcas guía ubicadas en el piso, para posteriormente mover el brazo correspondiente en dirección de la marca colocada para su pose respectiva. Estas marcas fueron ubicadas en posiciones específicas delante, a los lados y sobre la

ubicación del usuario de forma que el brazo genere ángulos rectos o nulos con respecto a los ejes coordenados globales.

La posición $\mathbf{P}_j = [x_j, y_j, z_j]$ alcanzada por el TCP del brazo robótico de interés en cada repetición, representada en coordenadas cartesianas globales, es calculada a partir de las posiciones angulares de cada motor dadas por sus respectivos encoders absolutos internos con una resolución de 0.0879° o 4096 posiciones por vuelta (AMS, 2017).

La norma ISO 9283 indica que la exactitud de posicionamiento AP_p se calcula mediante la ecuación (4-1).

$$AP_p = \sqrt{(\bar{x} - x_c)^2 + (\bar{y} - y_c)^2 + (\bar{z} - z_c)^2} \quad (4-1)$$

Donde $\bar{\mathbf{P}} = [\bar{x}, \bar{y}, \bar{z}]$ es la media (también llamado baricentro \mathbf{G}) de las $n = 30$ posiciones alcanzadas por el TCP del brazo robótico para una misma pose, y se obtienen mediante las ecuaciones (4-2) a (4-4).

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n x_j \quad (4-2)$$

$$\bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n y_j \quad (4-3)$$

$$\bar{z} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n z_j \quad (4-4)$$

Para cada una de las poses de prueba se calcula su respectiva exactitud de posicionamiento AP_p , para finalmente obtener la exactitud de posicionamiento final \overline{AP}_p como la media de las anteriores.

4.1.2. Pruebas de repetibilidad

La repetibilidad se define como el radio de la esfera que contiene el 99% de las posiciones alcanzadas $\mathbf{P}_j = [x_j, y_j, z_j]$ por el manipulador robótico durante n repeticiones, al ordenarle posicionarse a una misma posición deseada $\mathbf{P}_c = [x_c, y_c, z_c]$ desde una misma dirección (Barrientos, Peñín, Balaguer, & Aracil, 1997).

Se utilizaron los mismos datos obtenidos para el cálculo de la exactitud, ya que los parámetros se mantienen en concordancia a la norma ISO 9283, tomando en cuenta $n = 30$ repeticiones para cada una de las 5 poses de prueba seleccionadas.

La norma indica que la repetibilidad de posicionamiento RP_l se calcula mediante la ecuación (4-5).

$$RP_l = \bar{l} + 3 S_l \quad (4-5)$$

Donde \bar{l} está dada por las ecuaciones (4-6) y (4-7), S_l es la desviación estándar obtenida mediante la ecuación (4-8), $\bar{x}, \bar{y}, \bar{z}$ y x_j, y_j, z_j están definidos de la misma manera que en la sección 4.1.1.

$$\bar{l} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n l_j \quad (4-6)$$

$$l_j = \sqrt{(x_j - \bar{x})^2 + (y_j - \bar{y})^2 + (z_j - \bar{z})^2} \quad (4-7)$$

$$S_l = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n (l_j - \bar{l})^2}{n - 1}} \quad (4-8)$$

Para cada una de las poses de prueba se calcula su respectiva repetibilidad de posicionamiento RP_l , para finalmente obtener la repetibilidad de posicionamiento final \overline{RP}_l como la media de las anteriores.

4.1.3. Pruebas del tiempo de estabilización

El tiempo de estabilización de posición cuantifica qué tan rápido el manipulador robótico puede detenerse en la posición alcanzada (ISO, 1998). De acuerdo a la norma ISO 9283, se tomaron en cuenta los tiempos t_j medidos durante $n = 3$ repeticiones para una sola pose de prueba, y así finalmente calcular el tiempo medio de estabilización \bar{t} como la media de los valores anteriores.

4.2. PRUEBAS Y RESULTADOS DE LA TELEOPERACIÓN MEDIANTE ESQUELETIZACIÓN

Las pruebas realizadas mediante la técnica de esqueletización se realizaron ubicando al usuario aproximadamente a 40 cm delante de un fondo blanco completo con el fin de evitar interferencias visuales que puedan causar errores en la detección del esqueleto humano. El sensor Kinect se posicionó de frente al usuario a una distancia de 1.80 m y una altura de 1 metro, de tal forma que la totalidad del cuerpo humano de pie y con los brazos completamente levantados se encuentre dentro del rango de visión del mismo.

4.2.1. Exactitud

Los datos obtenidos en las pruebas de exactitud mediante la técnica de esqueletización se detallan en la presente sección para cada una de las poses de prueba realizadas.

Pose 1: Brazo izquierdo hacia adelante

La Figura 38 muestra la primera pose enviada a torso robótico y la respuesta del mismo ante dicha orden, donde la posición deseada para el TCP del brazo izquierdo en milímetros es $P_c = [562, 237, 624]$.



Figura 38. Pose de prueba 1 para esqueletización.

Los resultados de las posiciones x_j, y_j, z_j alcanzadas en las 30 repeticiones realizadas se resumen en la Figura 39 y la Tabla 26.

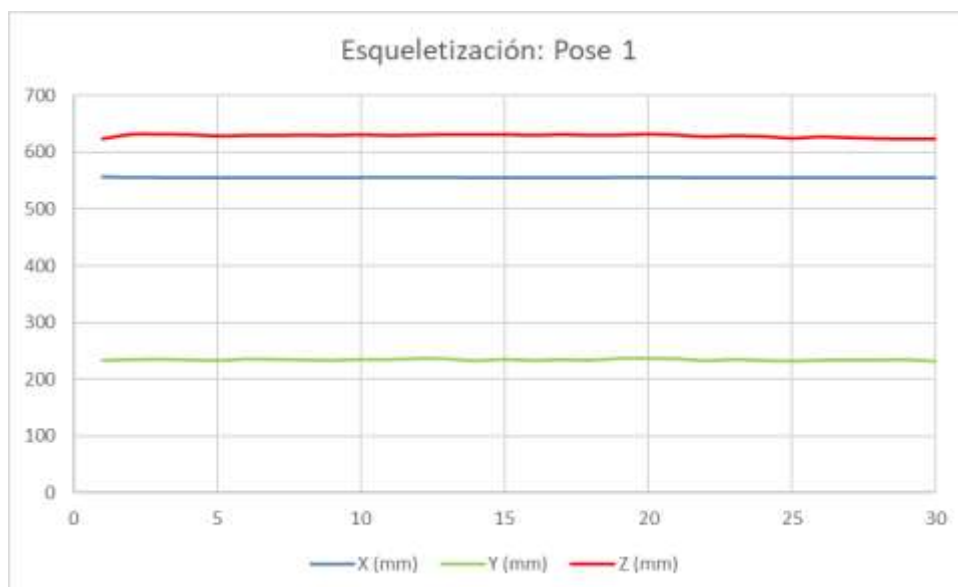


Figura 39. Resultados en pose 1 esqueletización.

Tabla 26*Exactitud de posicionamiento para pose 1 esqueletización*

	P_c (mm)	\bar{P} (mm)	$\bar{P} - P_c$ (mm)	AP_p (mm)
x	562	555.0	-7.0	9.15
y	237	234.4	-2.6	
z	624	629.3	5.3	

Pose 2: Brazo izquierdo hacia la izquierda

La Figura 40 muestra la segunda pose enviada a torso robótico y la respuesta del mismo ante dicha orden, donde la posición deseada para el TCP del brazo izquierdo en milímetros es $P_c = [0, 817, 624]$.

**Figura 40.** Pose de prueba 2 para esqueletización.

Los resultados de las posiciones x_j, y_j, z_j alcanzadas en las 30 repeticiones realizadas se resumen en la Figura 41 y la Tabla 27.



Figura 41. Resultados en pose 2 esqueletización.

Tabla 27

Exactitud de posicionamiento para pose 2 esqueletización

	P_c (mm)	\bar{P} (mm)	$\bar{P} - P_c$ (mm)	AP_P (mm)
x	0	7.4	7.4	10.06
y	817	811.0	-6.0	
z	624	627.2	3.2	

Pose 3: Brazo izquierdo hacia arriba

La Figura 42 muestra la tercera pose enviada a torso robótico y la respuesta del mismo ante dicha orden, donde la posición deseada para el TCP del brazo izquierdo en milímetros es $P_c = [0, 237, 1176]$.



Figura 42. Pose de prueba 3 para esqueletización.

Los resultados de las posiciones x_j, y_j, z_j alcanzadas en las 30 repeticiones realizadas se resumen en la Figura 43 y la Tabla 28.



Figura 43. Resultados en pose 3 esqueletización.

Tabla 28*Exactitud de posicionamiento para pose 3 esqueletización*

	P_c (mm)	\bar{P} (mm)	$\bar{P} - P_c$ (mm)	AP_P (mm)
x	0	-5.1	-5.1	
y	237	245.8	8.8	10.57
z	1176	1178.9	2.9	

Pose 4: Brazo derecho hacia la derecha

La Figura 44 muestra la cuarta pose enviada a torso robótico y la respuesta del mismo ante dicha orden, donde la posición deseada para el TCP del brazo izquierdo en milímetros es $P_c = [0, -817, 624]$.

**Figura 44.** Pose de prueba 4 para esqueletización.

Los resultados de las posiciones x_j, y_j, z_j alcanzadas en las 30 repeticiones realizadas se resumen en la Figura 45 y la Tabla 29.

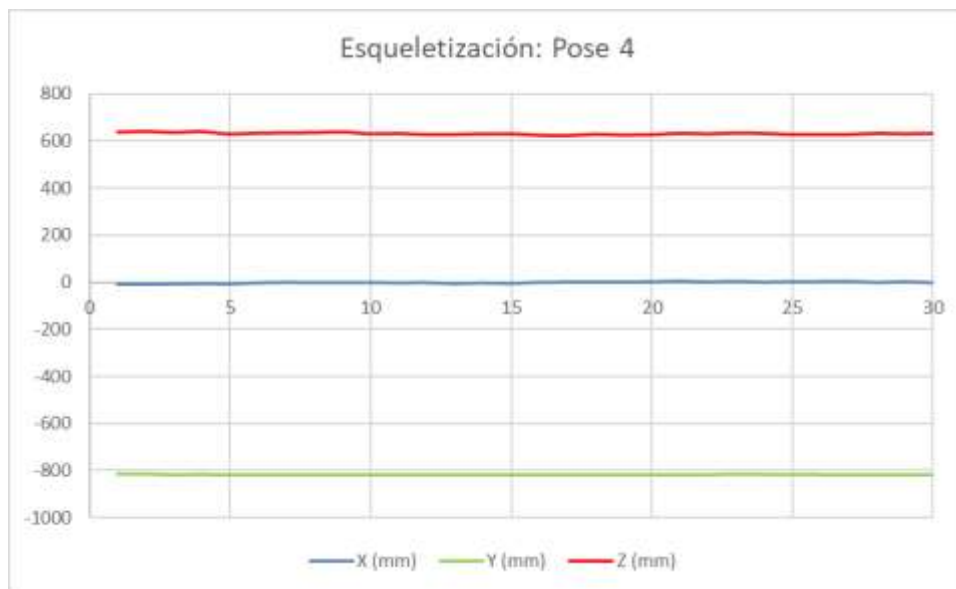


Figura 45. Resultados en pose 4 esqueletización.

Tabla 29

Exactitud de posicionamiento para pose 4 esqueletización

	P_c (mm)	\bar{P} (mm)	$\bar{P} - P_c$ (mm)	AP_P (mm)
x	0	-1.2	-1.2	7.42
y	-817	-813.1	3.9	
z	624	630.2	6.2	

Pose 5: Brazo derecho hacia arriba

La Figura 46 muestra la quinta pose enviada a torso robótico y la respuesta del mismo ante dicha orden, donde la posición deseada para el TCP del brazo izquierdo en milímetros es $P_c = [0, -237, 1176]$.



Figura 46. Pose de prueba 5 para esqueletización.

Los resultados de las posiciones x_j, y_j, z_j alcanzadas en las 30 repeticiones realizadas se resumen en la Figura 47 y la Tabla 30.



Figura 47. Resultados en pose 5 esqueletización.

Tabla 30*Exactitud de posicionamiento para pose 5 esqueletización*

	P_c (mm)	\bar{P} (mm)	$\bar{P} - P_c$ (mm)	AP_P (mm)
x	0	1.0	1.0	
y	-237	-236.1	0.9	2.22
z	1176	1177.8	1.8	

Exactitud de posicionamiento final mediante esqueletización

La exactitud de posicionamiento final \overline{AP}_P obtenida como la media de las exactitudes parciales resultantes de cada prueba se detalla en la Tabla 31.

Tabla 31*Resumen de exactitudes parciales y exactitud final para la técnica de esqueletización*

Pose de prueba	AP_P (mm)	\overline{AP}_P (mm)
1	9.15	
2	10.06	
3	10.57	7.88
4	7.42	
5	2.22	

4.2.2. Repetibilidad

Los datos utilizados para el cálculo de la repetibilidad son los mismos obtenidos en las pruebas de exactitud. Desde la Figura 48 hasta la Figura 52 se indican los valores obtenidos de l_j a partir de los datos de las 30 repeticiones realizadas en cada una de las 5 poses de pruebas, y su valor medio \bar{l} .

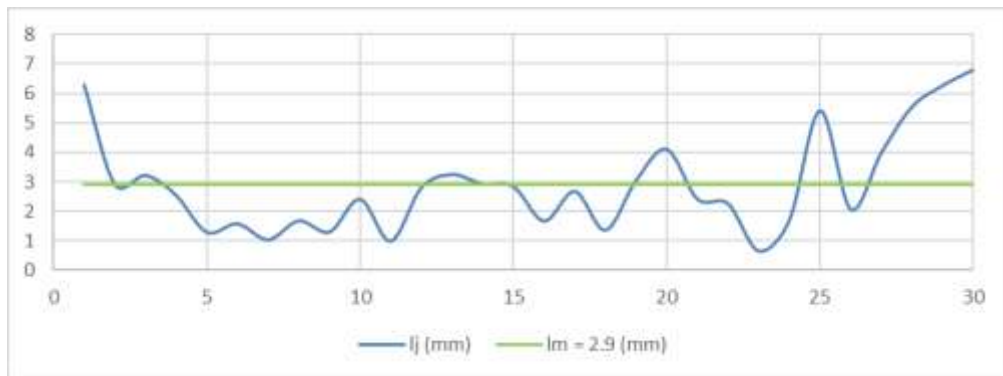


Figura 48. Resultados l_j y \bar{l} en pose 1 esqueletización.

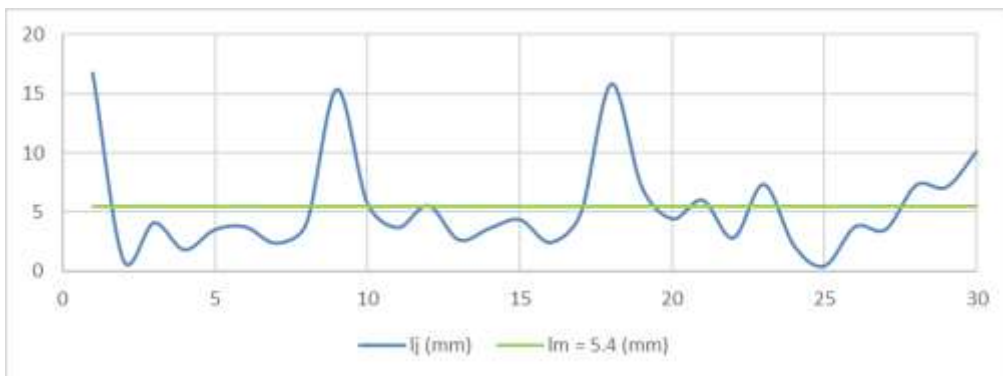


Figura 49. Resultados l_j y \bar{l} en pose 2 esqueletización.

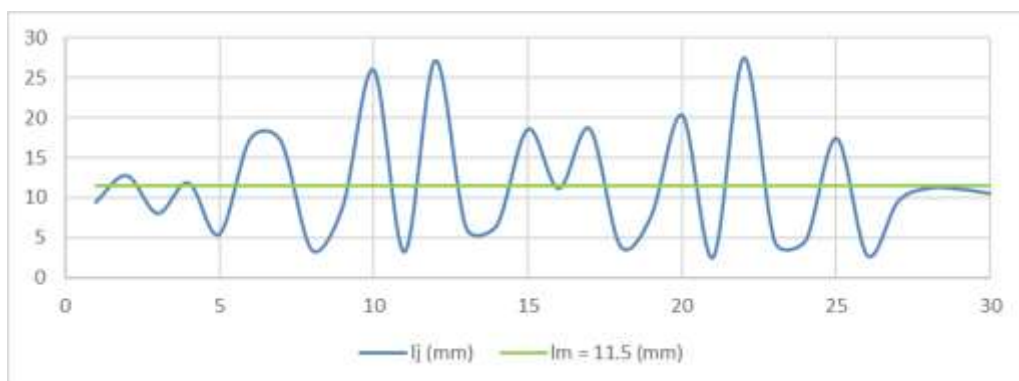


Figura 50. Resultados l_j y \bar{l} en pose 3 esqueletización.

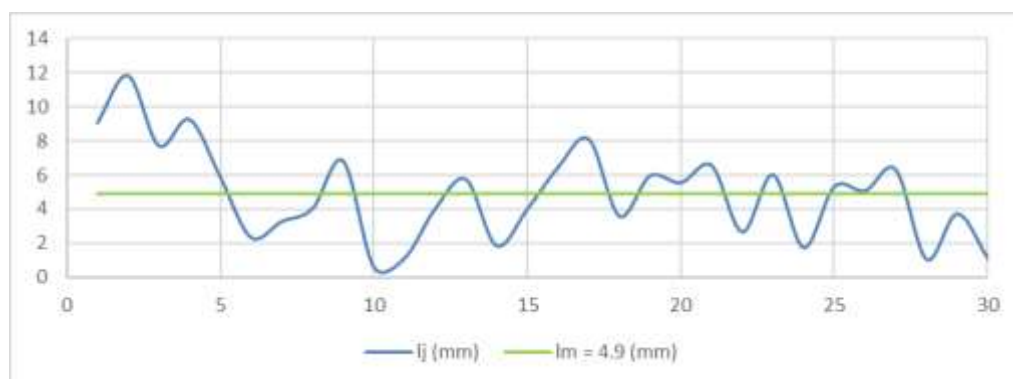


Figura 51. Resultados l_j y \bar{l} en pose 4 esqueletización.

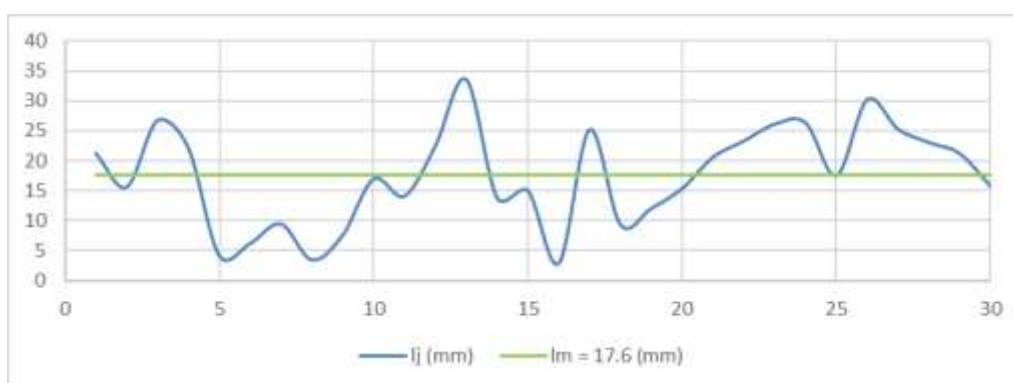


Figura 52. Resultados l_j y \bar{l} en pose 5 esqueletización.

Los valores de \bar{l} , S_l y la repetibilidad parcial RP_l obtenidos de cada una de las 5 poses de prueba, así como la repetibilidad de posicionamiento final \overline{RP}_l calculadas para la técnica de esqueletización, se resumen en la Tabla 32.

Tabla 32

Resumen de repetibilidades parciales y repetibilidad final para la técnica de esqueletización

Pose de prueba	\bar{l} (mm)	S_l (mm)	RP_l (mm)	\overline{RP}_l (mm)
1	2.9	1.7	7.92	22.95
2	5.4	4.1	17.83	
3	11.5	7.4	33.67	
4	4.9	2.8	13.18	
5	17.6	8.2	42.15	

4.2.3. Tiempo de estabilización

Los tiempos de estabilización fueron medidos realizando la pose de prueba 3. Los resultados obtenidos en las tres repeticiones realizadas, así como el tiempo medio de estabilización \bar{t} para la técnica de esqueletización, se detallan en la Tabla 33.

Tabla 33

Tiempos de estabilización para la técnica de esqueletización

Repetición	t_j (s)	\bar{t} (s)
1	4.19	4.56
2	4.53	
3	4.97	

4.3. PRUEBAS Y RESULTADOS DE LA TELEOPERACIÓN EN BASE A SENSORES INERCIALES

Las pruebas de teleoperación en base a sensores inerciales fueron realizadas ubicando los sensores en las posiciones descritas en la Figura 35, y calibrando los sensores en la posición inicial antes de cada repetición de las poses de prueba.

4.3.1. Exactitud

Los datos obtenidos en las pruebas de exactitud para la teleoperación en base al uso de sensores inerciales se detallan en la presente sección para cada una de las poses de prueba realizadas.

Pose 1: Brazo izquierdo hacia adelante

La Figura 53 muestra la primera pose enviada a torso robótico y la respuesta del mismo ante dicha orden, donde la posición deseada para el TCP del brazo izquierdo en milímetros es $P_c = [562, 237, 624]$.



Figura 53. Pose de prueba 1 con sensores inerciales.

Los resultados de las posiciones x_j, y_j, z_j alcanzadas en las 30 repeticiones realizadas se resumen en la Figura 54 y la Tabla 34.

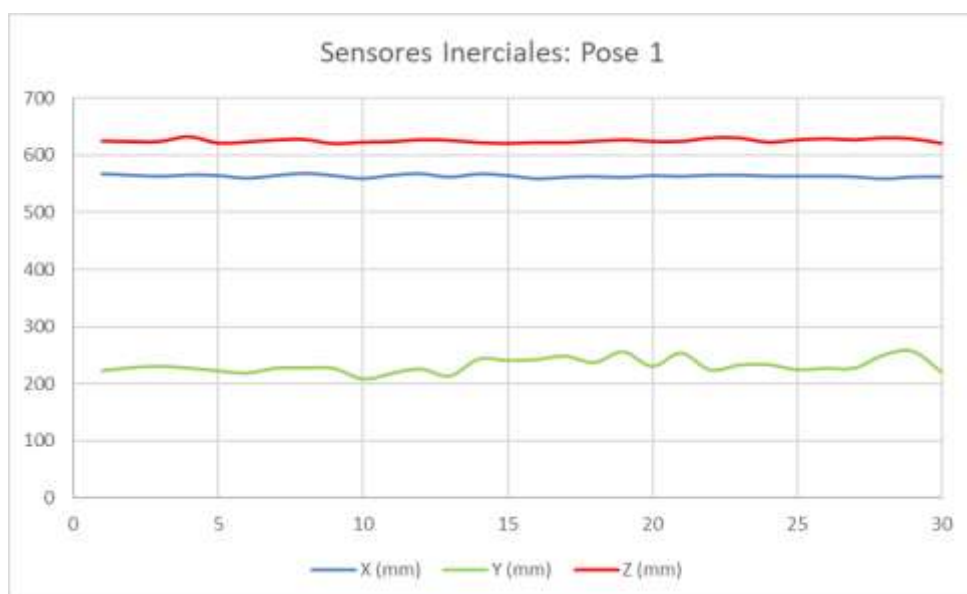


Figura 54. Resultados en pose 1 con sensores inerciales.

Tabla 34*Exactitud de posicionamiento para pose 1 sensores inerciales*

	P_c (mm)	\bar{P} (mm)	$\bar{P} - P_c$ (mm)	AP_P (mm)
x	562	563.9	1.9	5.16
y	237	232.3	-4.7	
z	624	624.8	0.8	

Pose 2: Brazo izquierdo hacia la izquierda

La Figura 55 muestra la segunda pose enviada a torso robótico y la respuesta del mismo ante dicha orden, donde la posición deseada para el TCP del brazo izquierdo en milímetros es $P_c = [0, 817, 624]$.

**Figura 55.** Pose de prueba 2 con sensores inerciales.

Los resultados de las posiciones x_j, y_j, z_j alcanzadas en las 30 repeticiones realizadas se resumen en la Figura 56 y la Tabla 35.

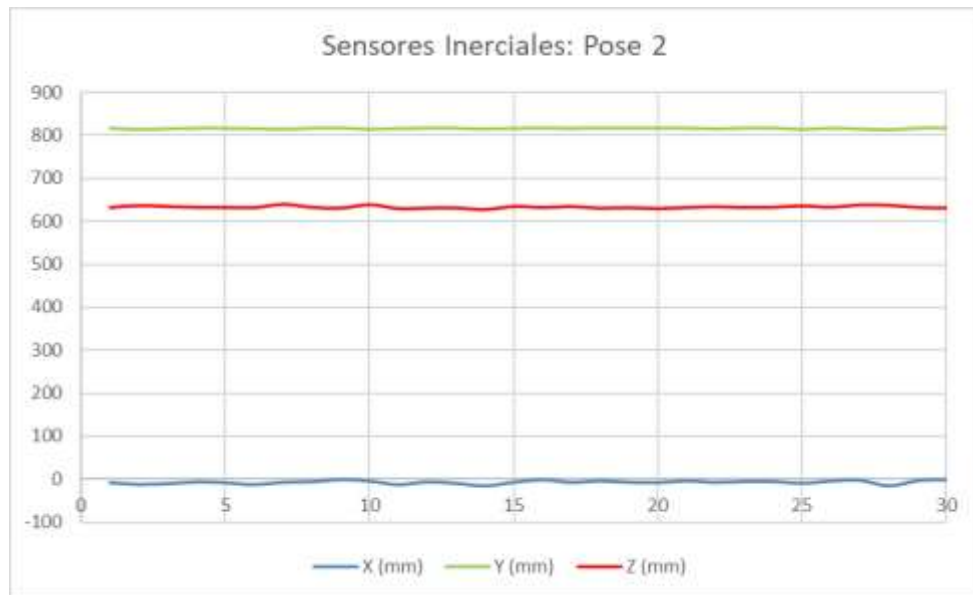


Figura 56. Resultados en pose 2 con sensores inerciales.

Tabla 35

Exactitud de posicionamiento para pose 2 sensores inerciales

	P_c (mm)	\bar{P} (mm)	$\bar{P} - P_c$ (mm)	AP_P (mm)
x	0	-6.7	-6.7	
y	817	815.4	-1.6	11.86
z	624	633.7	9.7	

Pose 3: Brazo izquierdo hacia arriba

La Figura 57 muestra la tercera pose enviada a torso robótico y la respuesta del mismo ante dicha orden, donde la posición deseada para el TCP del brazo izquierdo en milímetros es $P_c = [0, 237, 1176]$.



Figura 57. Pose de prueba 3 con sensores inerciales.

Los resultados de las posiciones x_j, y_j, z_j alcanzadas en las 30 repeticiones realizadas se resumen en la Figura 58 y la Tabla 36.

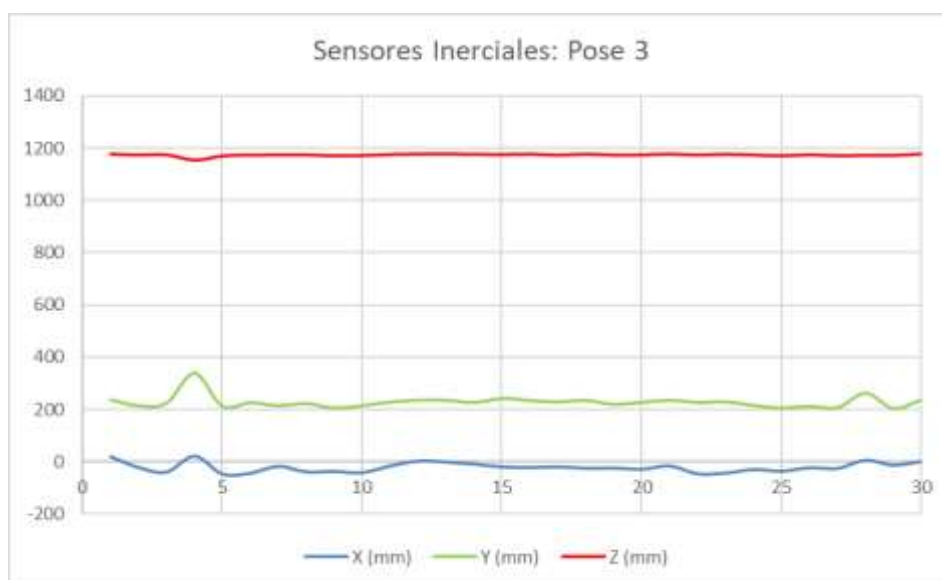


Figura 58. Resultados en pose 3 con sensores inerciales.

Tabla 36*Exactitud de posicionamiento para pose 3 sensores inerciales*

	P_c (mm)	\bar{P} (mm)	$\bar{P} - P_c$ (mm)	AP_P (mm)
x	0	-20.5	-20.5	
y	237	228.6	-8.4	22.44
z	1176	1172.3	-3.7	

Pose 4: Brazo derecho hacia la derecha

La Figura 59 muestra la cuarta pose enviada a torso robótico y la respuesta del mismo ante dicha orden, donde la posición deseada para el TCP del brazo izquierdo en milímetros es $P_c = [0, -817, 624]$.

**Figura 59.** Pose de prueba 4 con sensores inerciales.

Los resultados de las posiciones x_j, y_j, z_j alcanzadas en las 30 repeticiones realizadas se resumen en la Figura 60 y la Tabla 37.

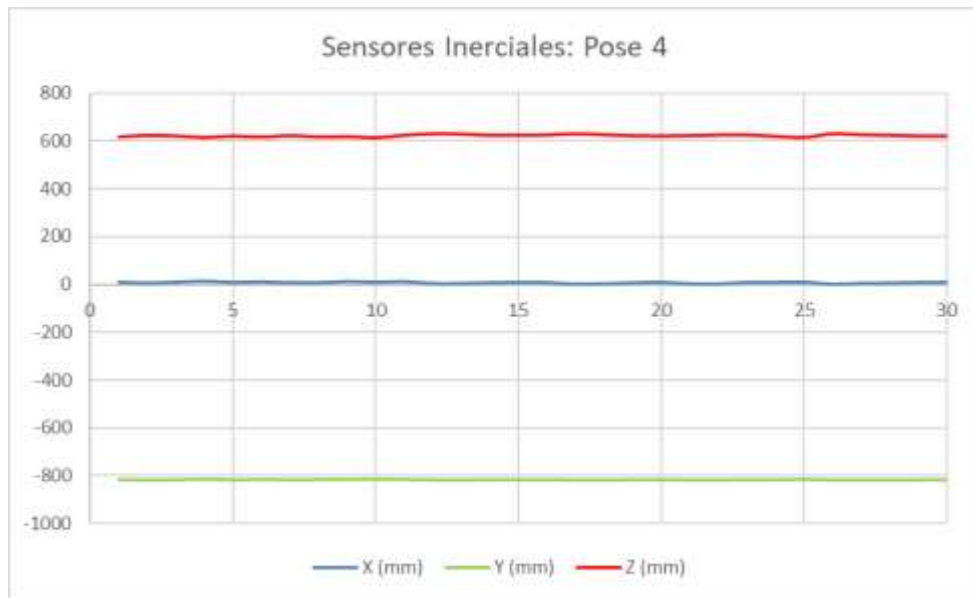


Figura 60. Resultados en pose 4 con sensores inerciales.

Tabla 37

Exactitud de posicionamiento para pose 4 sensores inerciales

	P_c (mm)	\bar{P} (mm)	$\bar{P} - P_c$ (mm)	AP_P (mm)
x	0	7.5	7.5	8.14
y	-817	-816.1	0.9	
z	624	620.9	-3.1	

Pose 5: Brazo derecho hacia arriba

La Figura 61 muestra la quinta pose enviada a torso robótico y la respuesta del mismo ante dicha orden, donde la posición deseada para el TCP del brazo izquierdo en milímetros es $P_c = [0, -237, 1176]$.



Figura 61. Pose de prueba 5 con sensores inerciales.

Los resultados de las posiciones x_j, y_j, z_j alcanzadas en las 30 repeticiones realizadas se resumen en la Figura 62 y la Tabla 38.

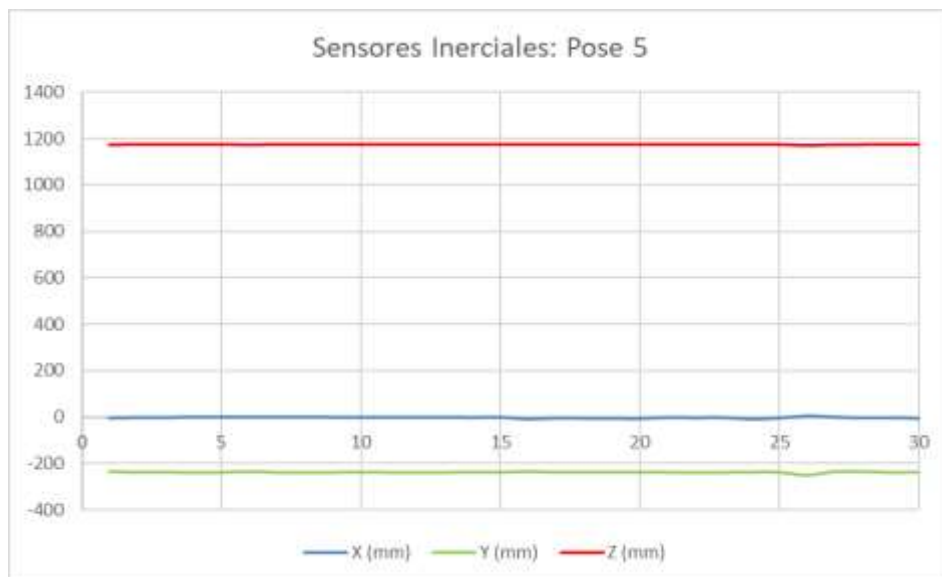


Figura 62. Resultados en pose 5 con sensores inerciales.

Tabla 38*Exactitud de posicionamiento para pose 5 sensores inerciales*

	P_c (mm)	\bar{P} (mm)	$\bar{P} - P_c$ (mm)	AP_P (mm)
x	0	-2.3	-2.3	
y	-237	-237.3	-0.3	2.29
z	1176	1175.9	0.1	

Exactitud de posicionamiento final mediante sensores inerciales

La exactitud de posicionamiento final \overline{AP}_P obtenida como la media de las exactitudes parciales resultantes de cada prueba se detalla en la Tabla 39.

Tabla 39*Resumen de exactitudes parciales y exactitud final para la técnica de teleoperación mediante sensores inerciales*

Pose de prueba	AP_P (mm)	\overline{AP}_P (mm)
1	5.16	
2	11.86	
3	22.44	9.98
4	8.14	
5	2.29	

4.3.2. Repetibilidad

Los datos utilizados para el cálculo de la repetibilidad son los mismos obtenidos en las pruebas de exactitud. Desde la Figura 63 hasta la Figura 67 se indican los valores obtenidos de l_j a partir de los datos de las 30 repeticiones realizadas en cada una de las 5 poses de pruebas, y su valor medio \bar{l} .

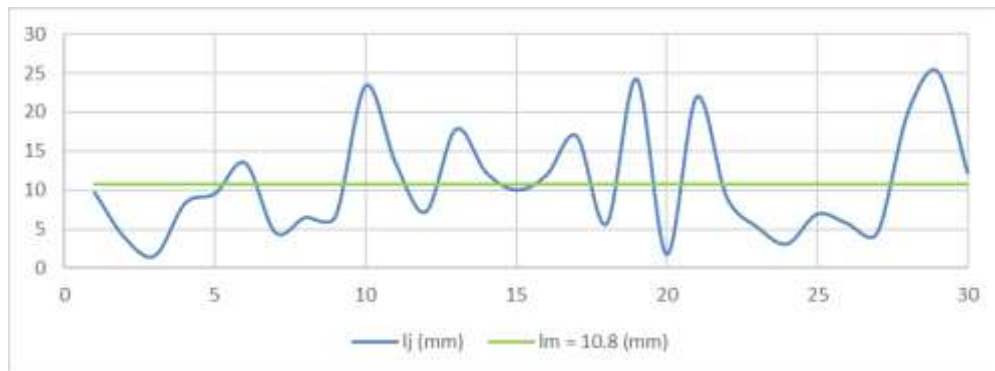


Figura 63. Resultados l_j y \bar{l} en pose 1 con sensores inerciales.

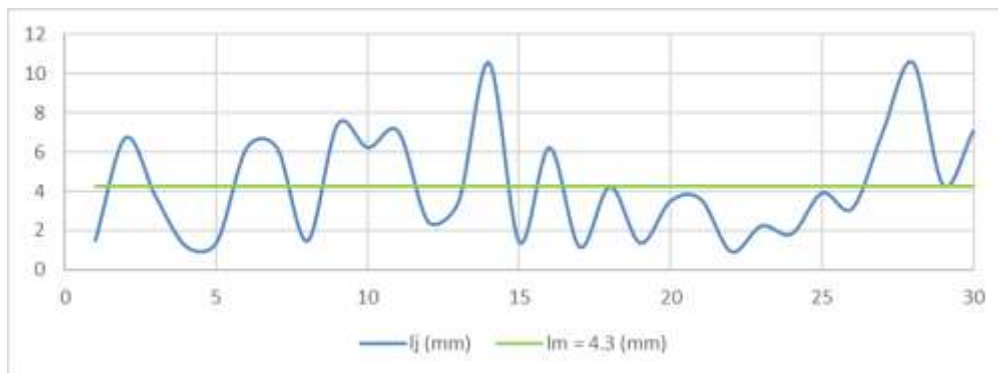


Figura 64. Resultados l_j y \bar{l} en pose 2 con sensores inerciales.

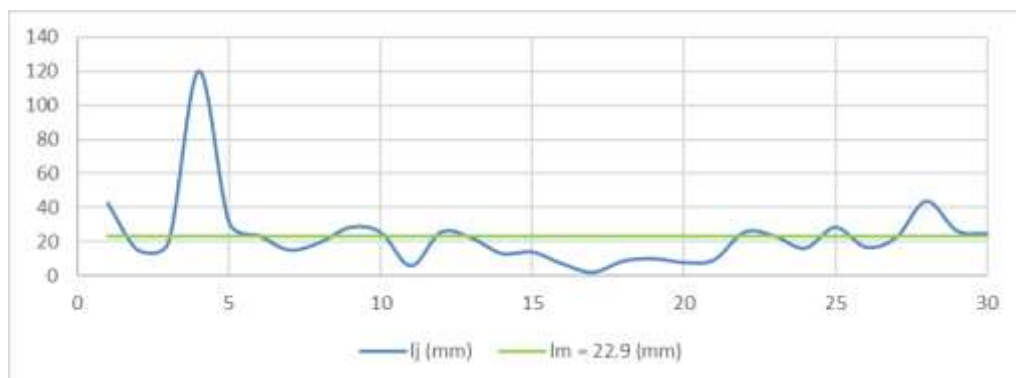


Figura 65. Resultados l_j y \bar{l} en pose 3 con sensores inerciales.

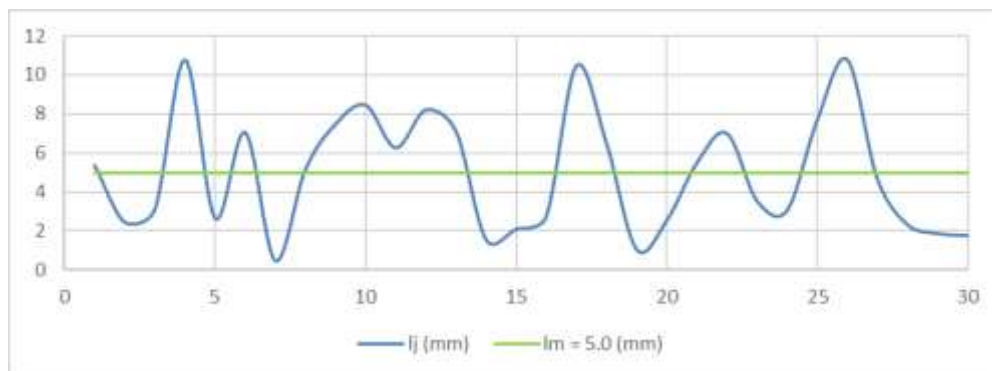


Figura 66. Resultados l_j y \bar{l} en pose 4 con sensores inerciales.

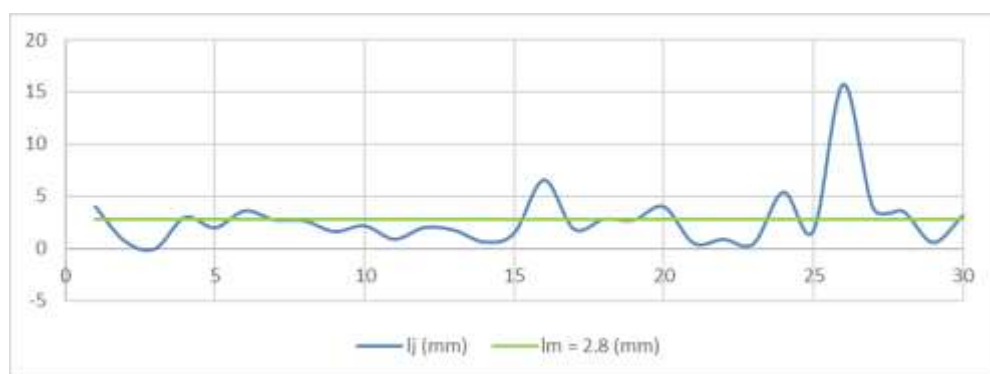


Figura 67. Resultados l_j y \bar{l} en pose 5 con sensores inerciales.

Los valores de \bar{l} , S_l y la repetibilidad parcial RP_l obtenidos de cada una de las 5 poses de prueba, así como la repetibilidad de posicionamiento final \overline{RP}_l calculadas para la teleoperación en base al uso de sensores inerciales, se resumen en la Tabla 40.

Tabla 40

Resumen de repetibilidades parciales y repetibilidad final para la técnica de teleoperación mediante sensores inerciales

Pose de prueba	\bar{l} (mm)	S_l (mm)	RP_l (mm)	\overline{RP}_l (mm)
1	10.8	6.9	31.42	31.01
2	4.3	2.8	12.56	
3	22.9	20.9	85.57	
4	5.0	3.0	14.08	
5	23.7	23.8	95.0	

4.3.3. Tiempo de estabilización

Los tiempos de estabilización fueron medidos realizando la pose de prueba 3. Los resultados obtenidos en las tres repeticiones realizadas, así como el tiempo medio de estabilización \bar{t} para la técnica de teleoperación mediante sensores inerciales, se detallan en la Tabla 41.

Tabla 41

Tiempos de estabilización mediante sensores inerciales

Repetición	t_j (s)	\bar{t} (s)
1	5.22	4.79
2	4.31	
3	4.85	

4.4. COMPARACIÓN DE LAS TÉCNICAS DE TELEOPERACIÓN DESARROLLADAS

La Tabla 42 detalla los resultados finales obtenidos en la teleoperación mediante las técnicas de esqueletización y el uso de sensores inerciales, teniendo en cuenta los parámetros calculados previamente: exactitud, repetibilidad y tiempo de estabilización.

Tabla 42

Tabla comparativa de parámetros entre técnicas de teleoperación

Parámetro	Esqueletización	Sensores Inerciales
Exactitud \overline{AP}_P	7.88 mm	9.98 mm
Repetibilidad \overline{RP}_I	22.95 mm	31.01 mm
Tiempo de estabilización \bar{t}	4.56 s	4.79 s

Se puede observar que la exactitud en ambas técnicas resulta ser muy similar, siendo el valor obtenido mediante sensores inerciales mayor con respecto al de esqueletización únicamente por únicamente 2.1 mm, lo que representa un 26.6 %. Los valores del tiempo de estabilización también se muestran cercanos, donde el tiempo obtenido mediante sensores inerciales es mayor con respecto al de esqueletización por 5.04 %. En cuanto a la repetibilidad, la técnica de esqueletización presenta una significativa ventaja frente a la técnica de sensores inerciales, siendo el segundo valor mayor con respecto al primero por 8 mm o un 35.1 %.

4.4.1. Análisis adicionales

Adicionalmente a la comparación cuantitativa realizada, se realizaron varias observaciones cualitativas que se consideró significativo mencionar en cuanto a la implementación y uso de las dos técnicas de teleoperación desarrolladas.

En cuanto a la ergonomía, adaptabilidad y facilidad de uso de estas técnicas, la teleoperación mediante esqueletización es la más adecuada ya que el usuario puede tomar el control del torso robótico sin la necesidad de tener un contacto físico directo con sensores o accesorios que puedan representar cierta incomodidad para el mismo. Por esta misma razón, se puede ejecutar un cambio de operario de una manera rápida y sencilla sin importar las diferencias morfológicas entre una persona y otra.

Por otro lado, la técnica de esqueletización requiere un ambiente más libre y controlado que la teleoperación mediante sensores inerciales, lo cual representa una clara desventaja para entornos de trabajo reducidos o que presenten objetos que puedan obstaculizar o interferir con la óptima detección de la postura del usuario mediante métodos de visión artificial.

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. CONCLUSIONES

Se realizó la repotenciación del torso robótico Salosbot, comenzando por el análisis de la carga estática impuesta sobre el segundo actuador de la cadena cinemática de cada brazo, con esto se determinó que el servomotor MX-64T es apto para el manejo de la articulación, por lo que se decidió mejorar el acople entre el motor y el eslabón mediante la fabricación de una pieza intermedia y la repotenciación del cableado de alimentación de la red de motores, al obtener resultados favorables con los cambios se procedió a colocar ventiladores en los dos primeros eslabones de cada brazo, con el fin de disminuir el calentamiento de los mismos y a su vez aumentar el tiempo de trabajo continuo de todo el sistema.

El diseño del prototipo se desarrolló en base a la norma VDI 2206 de diseño mecatrónico, la cual especifica un diseño concurrente de la parte mecánica, electrónica e informática del proyecto.

Se implementó la teleoperación mediante la técnica de esqueletización, utilizando el sensor Kinect V2, el cual realiza el procesamiento de la imagen RGB y el mapa de profundidades obtenidos, y entrega las coordenadas cartesianas de los puntos clave de los brazos del usuario: hombro, codo, muñeca, centro de la mano, pulgar e índice. A partir de estos puntos, se calcularon las posiciones angulares de cada motor para realizar la teleoperación por imitación, con resultados de 7.88 mm en exactitud, 22.95 mm en repetibilidad y tiempo de estabilización de 4.56 s.

Se implementó la teleoperación utilizando un traje con siete sensores inerciales de seis grados de libertad MPU-6050. Mediante el procesamiento de la información proporcionada en un microcontrolador Arduino UNO, se obtiene la orientación de cada eslabón del usuario, la cual es enviada al ordenador donde se calculan las posiciones angulares de cada motor para realizar la teleoperación, con resultados de 9.98 mm en exactitud, 31.01 mm en repetibilidad y tiempo de estabilización de 4.79 s.

Se desarrolló el protocolo experimental conforme a la norma ISO 9283 para la toma de datos en las pruebas con técnicas de teleoperación, orientado al análisis de exactitud, repetibilidad y tiempo de respuesta de las mismas. Este procedimiento se realizó para las técnicas de esqueletización por visión artificial y mediante el uso de un traje de sensores inerciales, de tal forma que el torso robótico imite los movimientos del usuario. Las coordenadas de las posiciones alcanzadas por el TCP de cada brazo del torso fueron guardadas en una hoja de cálculo para su posterior análisis.

Los resultados de la comparación de las técnicas de teleoperación, detallados en la Tabla 42, muestran una ventaja en la técnica de esqueletización en los parámetros de exactitud, repetibilidad y tiempo de estabilización, así como en ergonomía, adaptabilidad y facilidad de uso. Por otro lado, la teleoperación mediante el uso de sensores inerciales presenta también ciertas ventajas como la posibilidad de ser ejecutada en un entorno más reducido y menos controlados en cuanto a luz, tipo de fondo, y presencia de posibles obstáculos, además de tener menores requerimientos computacionales. Sin embargo, los resultados de ambas técnicas son aceptables para aplicaciones generales y podrían ser mejorados mediante el uso de sensores más especializados; por lo que se concluye que la selección de la técnica de teleoperación más óptima en aplicaciones específicas puede estar significativamente influenciada por la disponibilidad de recursos computacionales, cantidad de espacio físico asignado, necesidad de adaptabilidad y familiaridad de los usuarios con alguna de ellas.

5.2. RECOMENDACIONES Y TRABAJOS FUTUROS

A pesar de haber alcanzado resultados favorables con el uso de la unidad de medición inercial MPU-6050 para la teleoperación en base a sensores inerciales, se recomienda utilizar sensores de 9 grados de libertad para este tipo de aplicaciones, ya que la adición de magnetómetros ortogonales elimina la necesidad de implementar técnicas de calibración para corregir el error de deriva que se obtiene al solo usar acelerómetros y giroscopios, la cual es causada por la falta de un sistema de referencia fijo para los sensores.

Para el diseño de robots antropomorfos o de tipo humanoide como el torso robótico del presente proyecto, se recomienda que la longitud de los eslabones tenga una relación proporcional a la longitud de las partes del cuerpo humano para facilitar la naturalidad en los movimientos y semejanza en las posturas al momento de ejecutar la teleoperación.

BIBLIOGRAFÍA

- 3D Systems. (23 de Octubre de 2018). *Impresoras 3D, escaneado 3D, software, fabricación y servicios sanitarios / 3D Systems*. Obtenido de 3D Systems Touch Haptic Device: <https://es.3dsystems.com/haptics-devices/touch>
- 3Dconnexion. (12 de Noviembre de 2018). *3D Connexion Home Page*. Obtenido de Product SpaceMouse Pro: <https://www.3dconnexion.es/products/spacemouse/spacemousepro.html>
- Abbott, J., Marayong, P., & Okamura, A. (2007). Haptic Virtual Fixtures for Robot-Assited Manipulation. *Robotics Research. Springer Tracts in Advanced Robotics vol 28*, 49-64.
- AMS. (2017). *AS5045 Rotary Sensor*. Obtenido de ams: <https://ams.com/as5045>
- Analog Devices. (27 de Enero de 2018). *Analog Devices Documentación Técnica*. Obtenido de Digital Signal Processing Book: https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/dsp-book/dsp_book_Ch15.pdf
- Army Technology. (12 de Noviembre de 2018). *Army Technology*. Obtenido de iRobot 510 PackBot Multi-Mission Robot - Army Technology: <https://www.army-technology.com/projects/irobot-510-packbot-multi-mission-robot/>
- Asociación Británica de Visión por Computador. (05 de 12 de 2018). *Revisión de la Visión*. Recuperado el 05 de 12 de 2018, de ¿Qué es visión por computador?: <http://www.bmva.org/visionoverview>
- Barrientos, A., Peñín, L., Balaguer, C., & Aracil, R. (1997). *Fundamentos de robótica*. Madrid: McGraw-Hill.
- Carvajal, A., & Martínez, S. (2016). *Diseño y construcción de un torso robótico colaborativo de dos brazos para la unión de una junta empernada en una celda de trabajo*. Universidad de las Fuerzas Armadas "ESPE", Sangolquí, Ecuador.
- CEAACES. (2016). *Resultados de la acreditación y categorización vigentes*. Obtenido de CEAACES: <http://www.ceaaces.gob.ec/sitio/acreditacion-y-categorizacion/>
- Cheng, L., Sun, Q., Su, H., Cong, Y., & Zhao, S. (2012). Design and Implementation of Human-Robot Interactive Demonstration System Based on Kinect. *2012 24th Chinese Control and Decision Conference (CCDC)*.
- Da Silva, M., Abe, Y., & Popovic, J. (2008). Interactive Simulation os Stylized Human Locomotion. *ASM Transactions on Graphics*, 82.

- Granda , A. A., & Quiñónez , L. B. (2016). *Construcción de un prototipo robótico de 7 GDL teleoperado mediante captura de movimiento inercial*. Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, Departamento de ciencias de la energía y mecánica, Sangolquí.
- IDRE-S.A. (2017). *Rodamientos CMB*. Obtenido de IDRE: <http://idre-sa.com/hosting/idre/productos/rodamientos/rodamientos.php>
- Intuitive Surgical. (12 de Noviembre de 2018). *Intuitive | da Vinci Robotic Assisted Surgical Systems*. Obtenido de da Vinci SP: <https://www.intuitivesurgical.com/sp/>
- ISO. (1998). 9283: '*Manipulating industrial robots - Performance criteria and related test methods*'.
- Jazar, R. (2010). Inverse Kinematics: Iterative Technique. En *Theory of Applied Robotics: Kinematics , Dynamics, and Control* (págs. 357-361). Springer.
- Kobayashi, F., Hasegawa, K., Nakamoto, H., & Kojima, F. (2014). Motion capture with inertial measurements units for hand/arm robot teleoperation. *International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics* 45, 931-937.
- KUKA. (2018). *Robots Industriales de KUKA*. Obtenido de KUKA: <https://www.kuka.com/es-es>
- Mariano. (2011). *ABS*. Obtenido de Tecnología de los plásticos: <http://tecnologiadelosplasticos.blogspot.com/2011/06/abs.html>
- Mathworks. (2018). *Matlab: descripción general*. Obtenido de Mathworks: <https://la.mathworks.com/products/matlab.html>
- Microsoft. (2018). *Kinect for Windows*. Obtenido de Windows Dev Center: <https://developer.microsoft.com/en-us/windows/kinect>
- Minibots. (Agosto de 2015). *Componente IMU GY-521 para Fritzing*. Obtenido de Minibots Wordpress: <https://minibots.wordpress.com/2015/08/22/componente-imu-gy-521-para-fritzing/>
- Miura, K., Morisawa, M., & Kanehiro, F. (2011). Human-like walking with toe supporting for humanoids. *IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 4428.
- Morkar, B. (13 de Noviembre de 2017). *Kinect V2 gesture recognition*. Obtenido de Slideshare: <https://www.slideshare.net/Bhoomitmorkar1/kinect-v2-gesture-recognition>

- Nakaoka, S., Nakasawa, A., Hirukawa, H., & Ikeuchi, K. (2010). Learning from Observation Paradigm: Leg Task Models for Enabling a Biped Humanoid Robot to Imitate Human Dances. *The International Journal of Robotics Research*, 829-844.
- Norton, R. (2014). *Diseño de máquinas*. Inglaterra: Pearson.
- NSK, M. (30 de Junio de 2016). *Technical Insight: Selección de rodamientos y su disposición*. Obtenido de Sitio web de NSK: https://www.nskeurope.es/downloads/literature_bearing/SP-TI-0104-FINAL.pdf
- Parker, L. (2012). Decision making as optimization in multi-robot teams. *Distributed Computing and Internet Technology*, 35-49.
- Reyes, F. (2011). Cinemática de robots manipuladores. En *Robótica: Control de robots manipuladores*. Alfaomega.
- Robotis. (2015). *Dynamixel*. Obtenido de Robotis: <http://www.robotis.us/dynamixel/>
- Sánchez, A., & Terán, A. (2016). *Diseño y construcción de un brazo robótico antropomórfico de siete grados de libertad con análisis cinemático y dinámico mediante algoritmos genéticos*. Universidad de las Fuerzas Armadas "ESPE", Sangolquí.
- Santander Días, C. P. (2018). *Control de movimiento de un robot humanoide mediante señales EMG y giroscopios dentro de un ambiente simulado*. Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, Departamento de eléctrica y electrónica, Sangolquí.
- Siciliano Bruno, K. O. (2016). *Handbook of robotics*. Berlín: Springer.
- Siciliano, B., Sciavicco, L., Villani, L., & Oriolo, G. (2009). Kinematic Redundancy. En *Robotics: Modelling, Planning and Control* (págs. 87-88). Springer.
- Smith, C., Karayiannidis, Y., Nalpantidis, L., Gratal, X., Qi, P., Dimarogonas, D. V., & Kragic, D. (2012). Dual arm manipulation - A survey. *Robotics and Autonomous Systems*, 14.
- Spong, M., Hutchinson, S., & Vidyasagar, M. (2005). *Robot Modelling and Control*. John Wiley & Sons, Inc.
- TrosenRobotics. (2015). *Trosen robótica*.
- UGI-ESPE. (2016). *Líneas de investigación*. Obtenido de Unidad de Gestión de la Investigación - Universidad de las Fuerzas Armadas "ESPE": <http://ugi.espe.edu.ec/ugi/lineas-de-investigacion/>
- VDI-2206. (2014). *Design methodology for mechatronic systems*. Düsseldorf.

- Weather Spark. (2018). *El clima promedio en Sangolquí*. Obtenido de Weather Spark: <https://es.weatherspark.com/y/20029/Clima-promedio-en-Sangolqu%C3%AD-Ecuador-durante-todo-el-a%C3%B1o>
- Yamane, K., Anderson, S., & Hodgins, J. (2010). Controlling Humanoid Robots with Human Motion Data: Experimental Validation. *IEE-RAS 8 International Conference on Humanoid Robots*, 504-510.
- YF2009. (12 de Noviembre de 2018). *Amazon*. Obtenido de Amazon.com: PC Joystick, YF2009 USB Gaming Controller with Vibration Feedback and Throttle, Wired Flight Stick for PC Computer Laptop: Electronics: www.amazon.com/Joystick-YF2009-Controller-Vibration-Feedback/dp/B06XGBL1HL