

COMPARACIÓN DE CONTROLADORES PID Y CTC APLICADOS A UN ROBOT
PARALELO



AUTORES:

CRISTIAN CAMILO GONZÁLEZ FIGUEROA

DAVID FERNANDO SUÁREZ PATIÑO

UNIVERSIDAD DEL CAUCA

FACULTAD DE ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES

PROGRAMA DE INGENIERÍA EN AUTOMÁTICA INDUSTRIAL

POPAYÁN, CAUCA

2020

COMPARACIÓN DE CONTROLADORES PID Y CTC APLICADOS A UN ROBOT
PARALELO



TRABAJO DE GRADO

AUTORES:

CRISTIAN CAMILO GONZÁLEZ FIGUEROA

DAVID FERNANDO SUÁREZ PATIÑO

DIRECTOR: HERMES FABIÁN VARGAS ROSERO

CODIRECTOR: OSCAR ANDRÉS VIVAS ALBÁN

UNIVERSIDAD DEL CAUCA

FACULTAD DE ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES

PROGRAMA DE INGENIERÍA EN AUTOMÁTICA INDUSTRIAL

POPAYÁN, CAUCA

2020

AGRADECIMIENTOS

Para todos y todas
quienes a través de la cotidianidad,
de los momentos y de las grandes gestas
resisten la vida, construyen realidades
y crean todo aquello que hoy es.

En este trabajo de grado y siempre.

Gracias.

RESUMEN

En el presente trabajo se realiza un estudio comparativo de las estrategias de control PID (*Proporcional, Derivativo e Integral*) y CTC (*Control por Torque Calculado*) sobre un prototipo de un robot de estructura paralela evaluando la precisión, velocidad, aceleración y robustez de las estrategias de control.

Para la realización del estudio comparativo, se aborda el modelado y construcción de un prototipo de robot paralelo H4 sobre el que se busca implementar y evaluar comparativamente las estrategias de control en términos cualitativos y cuantitativos frente a tres trayectorias diferentes: Lineal, triangular y de tipo *Pick and Place*. Además, se evalúa el comportamiento de las estrategias ante variaciones de parámetros internos y externos como medida de la robustez de las mismas.

Como resultado del estudio comparativo de las dos estrategias de control, se observa y se documenta una mayor facilidad en la fase de implementación de la estrategia de control PID debido a no depender del modelo dinámico para la implementación del control. En contraposición, el control CTC presentó una mejor adaptabilidad ante modificaciones de masas, trayectorias y parámetros dinámicos, en conjunto a una reducción en el ruido de las señales producidas a comparación de la estrategia de control PID.

ABSTRACT

In the present work, a comparative study of PID (Proportional, Derivative and Integral) and CTC (Calculated Torque Control) control strategies on a prototype of a parallel structure robot is carried out, evaluating the precision, speed, acceleration and robustness of the control strategies.

In order to carry out the comparative study, the modeling and construction of a prototype of a parallel robot H4 on which it is sought to implement and comparatively evaluate the control strategies in qualitative and quantitative terms against three different trajectories: Linear, triangular and Pick and Place type. In addition, the behavior of the strategies against variations of internal and external parameters is evaluated as a measure of their robustness.

As a result of the comparative study of the two control strategies, it is observed and documented a greater ease in the implementation phase of the PID control strategy due to not depending on the dynamic model for the implementation of the control. In contrast, the CTC control showed better adaptability to changes in masses, trajectories and dynamic parameters, together with a reduction in the noise of the signals produced compared to the PID control strategy.

CONTENIDO

Contenido	IV
Índice de tablas	IX
Índice de figuras	X
Introducción	1
1. Generalidades	3
1.1. Planteamiento del problema	4
1.2. Estado del arte	5
1.2.1. Aplicaciones de los robots paralelos	5
1.2.2. Principales controladores utilizados en robótica paralela	12
1.3. Objetivos	13
1.3.1. Objetivo general	13
1.3.2. Objetivos específicos	13
1.4. Metodología	13
2. Marco teórico	15
2.1. Definición de robótica	16
2.2. Clasificación de robots	16
2.2.1. Clasificación de robots por generación	17
2.2.2. Clasificación según ISO	18
2.3. Robots manipuladores	19
2.3.1. Definición de robot manipulador	19
2.3.2. Componentes de los robots manipuladores	19
2.3.3. Clasificación de robots manipuladores	20
2.3.3.1. Robots seriales	20
2.3.3.2. Robots paralelos	21
2.4. Teoría básica de mecanismos para robots	27
2.4.1. Definición de mecanismo	27
2.4.2. Fundamentos de mecanismos	28
2.4.3. Tipos de elementos y pares cinemáticos	28

2.4.3.1.	Clasificación de elementos	28
2.4.3.2.	Clasificación de pares cinemáticos	29
2.4.4.	Criterio de Grübler	31
2.4.4.1.	Criterio de Grübler en el plano	31
2.4.4.2.	Criterio de Grübler en el espacio o criterio de Malishev	32
2.4.5.	Engranajes	32
2.4.5.1.	Transmisión de movimiento por engranajes	32
2.4.5.2.	Clasificación de engranajes	32
2.5.	Mecánica de robots	34
2.5.1.	Cinemática de robots	35
2.5.1.1.	Análisis de posicionamiento y orientación	35
2.5.1.2.	Análisis de velocidades	36
2.5.2.	Dinámica de robots	37
2.6.	Control de robots manipuladores	38
2.6.1.	Control PID	39
2.6.1.1.	Características básicas del control PID	39
2.6.1.2.	Control PID para robots manipuladores	40
2.6.1.3.	Sintonización de control PID	40
2.6.2.	Control por torque calculado	41
2.6.2.1.	Linealidad en lazo cerrado	42
3.	Análisis cinemático, dinámico y diseño de controladores	43
3.1.	Descripción de la estructura paralela	44
3.2.	Análisis geométrico de un robot H4	45
3.2.1.	Análisis geométrico superior	46
3.2.2.	Análisis geométrico inferior	48
3.3.	Modelo cinemático inverso	50
3.4.	Modelo cinemático directo	52
3.5.	Matriz jacobiana	52
3.6.	Estimación del volumen de trabajo	53
3.7.	Modelo dinámico de robot H4	55
3.8.	Diseño de controladores	57
3.8.1.	Control PID para robot H4	57
3.8.2.	Control CTC para robot H4	60
4.	Desarrollo e implementación del prototipo	64
4.1.	Elementos estructurales y mecánicos	65
4.1.1.	Caracterización de la estructura	65
4.1.2.	Elementos de las cadenas cinemáticas	66
4.1.2.1.	Soporte del motor	66
4.1.2.2.	Soporte del antebrazo	67
4.1.2.3.	Alma del antebrazo	68
4.1.2.4.	Antebrazo	68
4.1.2.5.	Brazos	69
4.1.2.6.	Acoples para tensores	69

4.1.2.7.	Uniones esféricas	70
4.1.2.8.	Uniones T	70
4.1.2.9.	Góndola	71
4.1.2.10.	Vista general del diseño del robot	72
4.2.	Elementos de medición y accionamiento	77
4.2.1.	Sensores	77
4.2.2.	Actuadores	77
4.3.	Elementos de control	79
4.3.1.	Tarjeta electrónica de control maestro	79
4.3.2.	Tarjeta electrónica de control esclavo	80
4.4.	Elementos de sistema de potencia	81
4.4.1.	Módulos de control de motores	81
4.4.2.	Fuente de alimentación	82
4.4.3.	Módulo regulador de voltaje	82
4.5.	Protocolos de comunicación	83
4.5.1.	Protocolo de comunicación USART	83
4.5.2.	Protocolo de comunicación I2C	85
4.6.	Conexión eléctrica de componentes	87
4.6.1.	Conexión eléctrica del sistema de control	88
4.6.2.	Conexión eléctrica del sistema de potencia	88
4.6.3.	Diseño en PCB para montaje electrónico	89
4.7.	Implementación del prototipo	91
4.7.1.	Estructura de soporte	91
4.7.2.	Ensamble de cadenas cinemáticas	92
4.7.3.	Montaje de la fase de potencia y del sistema de control	95
4.7.4.	Ajustes del comportamiento	96
4.7.4.1.	Ajuste de la respuesta del sistema de potencia	96
4.7.4.2.	Filtrado de señales	97
4.7.5.	Implementación del sistema de control	97
4.7.5.1.	Configuración del software de control	98
4.7.5.2.	Configuración de microcontroladores esclavo	100
4.7.6.	Interfaz de usuario	101
4.7.7.	Resultados de implementación	105
4.7.8.	Consideraciones finales sobre el prototipo	107
4.7.8.1.	Consideraciones del sistema de control	107
4.7.8.2.	Consideraciones del sistema mecánico	107
4.7.8.3.	Consideraciones sobre los sensores	107
4.7.8.4.	Consideraciones sobre el modelo 3D	108
5.	Pruebas y resultados	109
5.1.	Aspectos preliminares	110
5.1.1.	Marco de referencia	110
5.1.2.	Trayectorias establecidas	111
5.1.2.1.	Trayectoria lineal	111
5.1.2.2.	Trayectoria Triangular	112

5.1.2.3. Trayectoria Pick and place	113
5.1.3. Trayectoria de inicialización	113
5.2. Parámetros geométricos y dinámicos	114
5.3. Sintonización de controladores	115
5.3.1. Sintonización de control PID	115
5.3.2. Sintonización del controlador CTC	115
5.4. Desempeño de control PID y CTC	116
5.4.1. Desempeño del control PID Y CTC en trayectoria lineal	116
5.4.1.1. Análisis de precisión de control PID y CTC	116
5.4.1.2. Análisis de velocidad del control PID y CTC	120
5.4.1.3. Análisis de aceleración del control PID y CTC	121
5.4.2. Desempeño de control PID Y CTC en trayectoria triangular	122
5.4.2.1. Análisis de precisión de control PID y CTC	122
5.4.2.2. Análisis de velocidad del control PID y CTC	126
5.4.2.3. Análisis de aceleración del control PID y CTC	127
5.4.3. Desempeño de control PID Y CTC en trayectoria pick and place	128
5.4.3.1. Análisis de precisión de control PID y CTC	128
5.4.3.2. Análisis de velocidad del control PID y CTC	131
5.4.3.3. Análisis de aceleración del control PID y CTC	132
5.5. Análisis de robustez de las estrategias de control PID y CTC	134
5.5.1. Análisis interpretativo	134
5.5.2. Análisis cuantitativo	135
6. Conclusiones y trabajos futuros	142
6.1. Conclusiones	143
6.1.1. Requisitos para la implementación	143
6.1.2. Diferencias de comportamiento en condiciones normales	143
6.1.3. Diferencias de comportamiento ante perturbaciones e incertidumbre	143
6.2. Trabajos futuros	144
Referencias	149
Anexos	150
A. Diseño y fabricación de piezas para el robot H4.	150
A.1. Alma para el antebrazo	151
A.2. Antebrazos	153
A.3. Soporte del antebrazo	154
A.4. Soporte del motor	156
A.5. Acoples en T	156
A.6. Base móvil	158
B. Simulación CoppeliaSim y ajuste de modelos geométricos	162
B.1. Generalidades CoppeliaSim	162
B.2. Importación de mallas	163
B.3. Ubicación de juntas	163

B.4. Jerarquía de Objetos 164
B.5. Simulación y comparación de datos 165

ÍNDICE DE TABLAS

2.1. Clasificación por generación [39]	18
2.2. Pares mas usados en mecanismos por clase [51].	31
5.1. Parámetros geométricos.	114
5.2. Parámetros dinámicos.	115
5.3. Ganancias PID	115
5.4. Ganancias CTC	116

ÍNDICE DE FIGURAS

1.1. Robot paralelo para cirugía ocular [18]	6
1.2. Robot paralelo esférico de 3 grados [21]	7
1.3. Robot para estudios postulares dinámicos [22]	7
1.4. Sysmac delta [27]	8
1.5. Robot Quattro [24]	9
1.6. Robot veloce [25]	9
1.7. Robot paralelo para mecanizado de piezas [29]	10
1.8. Robot paralelo para impresión de piezas en 3D [29]	11
1.9. Robot DeltaX [31]	11
1.10. Robot paralelo planar [33].	12
2.1. Estructura general de robots seriales [46]	21
2.2. Estructura general de robots paralelos [46]	21
2.3. Delta robot patentado por Clavel [5]	23
2.4. Esquema general del robot H4 [34]	25
2.5. Robot H4 con 4 juntas prismáticas [34]	25
2.6. Robot H4 con 4 juntas rotacionales [34]	26
2.7. Robot H4 con 4 juntas prismáticas y configuración asimétrica [34]	26
2.8. Robot H4 con 4 juntas rotacionales y configuración asimétrica [34]	27
2.9. Clasificación de elementos por número de pares [51].	29
2.10. Clasificación de pares por número de elementos [51].	30
2.11. Clasificación de pares por tipo de cierre [51].	30
2.12. Engranaje recto [52].	33
2.13. Engranaje helicoidal [52].	33
2.14. Engranaje no paralelos coplanares [52].	34
2.15. Tornillo sin fin corona [52].	34
2.16. Jacobiana directa e inversa	37
2.17. Esquema general PID [55].	39
2.18. Esquema PID para un robot manipulador [54].	40

2.19. Esquema control CTC 2.6.4.	41
3.1. Diagrama descripción de juntas	44
3.2. Robot H4	44
3.3. Disposición de motores [3]	45
3.4. Góndola o base móvil [3]	45
3.5. Vista lateral de robot H4 [3]	45
3.6. Cálculo del vector OP_1	47
3.7. Cálculo del vector OP_2	47
3.8. Cálculo del vector OP_3	47
3.9. Cálculo del vector OP_4	47
3.10. Vista superior	48
3.11. Vista lateral	48
3.12. Cálculo de matriz DA_1	49
3.13. Cálculo de matriz DA_2	49
3.14. Cálculo de matriz DA_3	50
3.15. Cálculo de matriz DA_4	50
3.16. Espacio de trabajo para los planos X-Y.	53
3.17. Espacio de trabajo para los planos X-Z.	54
3.18. Espacio de trabajo para los planos Y-Z.	54
3.19. Espacio de trabajo para los planos X-Y-Z, vista 1.	55
3.20. Espacio de trabajo para los planos X-Y-Z, vista 2.	55
3.21. Góndola en forma de H [60]	56
3.22. Control PID robot H4	57
3.23. Esquema general del control PID implementado	58
3.24. Esquema general del control PID implementado: Data read	58
3.25. Esquema general del control PID implementado: MGI	59
3.26. Esquema general del control PID implementado: PID	59
3.27. Esquema general del control PID implementado: Protection	60
3.28. Esquema general del control PID implementado: Data writing	60
3.29. Control CTC robot H4	61
3.30. Esquema general del control CTC implementado	62
3.31. Esquema general del control CTC implementado	62
3.32. Esquema general del control CTC implementado	63
4.1. Estructura de soporte del robot. (Vista Frontal)	65
4.2. Estructura de soporte del robot. (Vista Lateral)	65
4.3. Estructura de soporte del robot. (Vista isométrica)	66
4.4. Soporte del motor en modelo 3D renderizado	67
4.5. Soporte del antebrazo en modelo 3D renderizado - Vista A	67
4.6. Soporte del antebrazo en modelo 3D renderizado - Vista b	67
4.7. Alma del antebrazo modelado en 3D renderizado	68
4.8. Antebrazo modelado en 3D renderizado	69
4.9. Brazos de robot H4	69
4.10. Acoples para tensores	70
4.11. Juntas de rotula	70

4.12. Juntas de T	71
4.13. Góndola del robot vista frontal	71
4.14. Góndola del robot vista posterior	71
4.15. Robot H4 propuesto, vista isométrica.	72
4.16. Robot H4 propuesto, perspectiva inferior.	73
4.17. Robot H4 propuesto, vista isométrica con transparencia en base rígida.	74
4.18. Robot H4 propuesto, sección superior.	74
4.19. Robot H4 propuesto, vista frontal.	75
4.20. Robot H4 propuesto, vista lateral.	75
4.21. Robot H4 propuesto, vista trasera.	76
4.22. Robot H4 propuesto, vista inferior.	76
4.23. Potenciómetro	77
4.24. Motor-reductor CHR GM25 370	78
4.25. Tornillo sin fin - Corona	78
4.26. Arduino UNO [63]	79
4.27. Arduino Nano [63]	80
4.28. Modulo puente H L298N	81
4.29. Fuente de alimentación.	82
4.30. Modulo regulador LM317.	83
4.31. Esquema protocolo USART.	84
4.32. Secuencia de envío de un carácter. [64]	84
4.33. Comunicación simulink-arduino [65]	85
4.34. Comunicación bus i2c entre dispositivos. [66]	86
4.35. Comunicación bus i2c. [66]	87
4.36. Conexión I2C microcontroladores.	87
4.37. Conexión eléctrica del sistema de control	88
4.38. Conexiones eléctricas del sistema de potencia	89
4.39. Diseño 3D de PCB.	90
4.40. Diagrama de conexiones de PCB.	90
4.41. Estructura de soporte del robot. (Vista Frontal)	91
4.42. Estructura de soporte del robot. (Vista Lateral)	91
4.43. Estructura de soporte del robot. (Vista isométrica)	92
4.44. Vista de los soportes, antebrazos y motores (Vista Frontal)	93
4.45. Vista de los soportes, antebrazos y motores (Vista Lateral)	93
4.46. Vista de los soportes, antebrazos y motores (Vista Isométrica)	94
4.47. Acople barras paralelas extremo superior	94
4.48. Acople barras paralelas extremo inferior	94
4.49. Tensores de barras paralelas	95
4.50. Sección electrónica ensamblada	95
4.51. Voltaje de salida L298n ante diferentes frecuencias de PWM	96
4.52. Bloques lectura de datos I2C	98
4.53. Bloques escritura de datos I2C	98
4.54. Configuración bloque “Master read”	98
4.55. Configuración bloque “Byte unpack”	99
4.56. Configuración bloque “Byte pack”	99

4.57. Configuración bloque “Master write”	100
4.58. Inicialización I2C Arduino	100
4.59. Función envío de datos a través de I2C.	101
4.60. Función de lectura de datos a través de I2C.	101
4.61. Interfaz de usuario.	102
4.62. Trajectory Start.	103
4.63. Control effort start.	103
4.64. Joint trajectory.	103
4.65. Cartesian trajectory.	104
4.66. Velocity.	104
4.67. Acceleration.	105
4.68. Robot H4 implementado, vista frontal.	105
4.69. Robot H4 implementado, vista lateral.	106
4.70. Robot H4 implementado, isométrica.	106
5.1. Robot H4 propuesto en posición inicial, vista frontal.	110
5.2. Robot H4 propuesto en posición inicial, vista lateral.	111
5.3. Trayectoria lineal.	112
5.4. Trayectoria triangular.	112
5.5. Trayectoria Pick and Place.	113
5.6. Trayectoria de inicialización	114
5.7. Seguimiento de trayectoria lineal con PID	117
5.8. Error medio cuadrático trayectoria lineal con PID	117
5.9. Consignas articulares deseadas vs obtenidas con PID	118
5.10. Seguimiento de trayectoria lineal con CTC	119
5.11. Error medio cuadrático trayectoria lineal con CTC	119
5.12. Consignas articulares deseadas vs obtenidas con CTC	119
5.13. Velocidad articular de trayectoria lineal con control PID	120
5.14. Velocidad articular de trayectoria lineal con control CTC	120
5.15. Aceleración articular de trayectoria lineal con control PID	121
5.16. Aceleración articular de trayectoria lineal con control CTC	122
5.17. Seguimiento de trayectoria triangular con PID	123
5.18. Error medio cuadrático trayectoria triangular con PID	123
5.19. Consignas articulares deseadas vs obtenidas con CTC	124
5.20. Seguimiento de trayectoria triangular con CTC	125
5.21. Error medio cuadrático trayectoria triangular con CTC	125
5.22. Consignas articulares deseadas vs obtenidas con CTC	125
5.23. Velocidad articular de trayectoria lineal con control PID	126
5.24. Velocidad articular de trayectoria lineal con control CTC	126
5.25. Aceleración articular de trayectoria lineal con control PID	127
5.26. Aceleración articular de trayectoria lineal con control CTC	128
5.27. Seguimiento de trayectoria pick and place con PID	129
5.28. Error medio cuadrático trayectoria pick and place con PID	129
5.29. Consignas articulares deseadas vs obtenidas con PID	129
5.30. Seguimiento de trayectoria pick and place con CTC	130

5.31. Error medio cuadrático trayectoria pick and place con CTC	130
5.32. Consignas articulares deseadas vs obtenidas con CTC	131
5.33. Velocidad articular de trayectoria pick and place con control PID	131
5.34. Velocidad articular de trayectoria pick and place con control CTC	132
5.35. Aceleración articular de trayectoria pick and place con control PID	133
5.36. Aceleración articular de trayectoria pick and place con control CTC	133
5.37. Disposición de la masa adicional	135
5.38. Seguimiento articular para sistema con control PID y masa	136
5.39. Error medio para sistema con control PID y masa	136
5.40. Seguimiento cartesiano para sistema con control PID y masa	137
5.41. Seguimiento en velocidad para sistema con control PID y masa	137
5.42. Seguimiento en aceleración para sistema con control PID y Masa	138
5.43. Seguimiento articular para sistema con control CTC y masa	139
5.44. Error medio para sistema con control CTC y masa	139
5.45. Seguimiento cartesiano para sistema con control CTC y masa	140
5.46. Seguimiento en velocidad para sistema con control CTC y masa	140
5.47. Seguimiento en aceleración para sistema con control CTC y Masa	141
A.1. Detalle del robot - A.	150
A.2. Detalle del robot - B.	151
A.3. Plano del alma del antebrazo.	152
A.4. Plano del antebrazo.	153
A.5. Plano del soporte del antebrazo.	155
A.6. Plano del soporte de motor.	156
A.7. Plano de acople en T.	157
A.8. Plano de la base móvil - Pieza externa.	158
A.9. Plano de la base móvil - Pieza central.	159
A.10. Plano de la base móvil - Órgano terminal.	160
B.1. Importación de mallas a CoppeliaSim.	163
B.2. junta angular, junta prismática, tornillo y junta esférica [68]	164
B.3. Juntas robot H4 CoppeliaSim.	164
B.4. Jerarquía de objetos en CoppeliaSim.	165
B.5. Error de ángulos entre Matlab y CoppeliaSim	166

INTRODUCCIÓN

El presente trabajo de grado estudia comparativamente el desempeño de dos estrategias de control: PID y CTC, en términos de posición, velocidad, aceleración y robustez para el seguimiento de trayectorias implementadas en una estructura robótica paralela experimental.

Las estrategias de control son algoritmos encargados de determinar las acciones necesarias para llevar un sistema a un estado deseado, partiendo de la información disponible sobre el estado actual y/o las características del mismo. La estrategia de control PID, ampliamente usada en el sector industrial por su efectividad y simplicidad en el control de sistemas [1], toma como entrada el valor presente y el valor deseado de la variable manipulada; visualizando el sistema como una "caja negra" al no considerar su modelo matemático. Por otra parte el control CTC es un control dinámico que incluye las variables de estado del sistema a controlar y es usado en el control de movimiento de diferentes robots como en manipuladores de estructura paralela [2] [3].

Los robots de estructura paralela presentan una estructura de cadena cinemática cerrada, con mejores características en cuanto a precisión, velocidad y capacidad de carga, pero limitados en el espacio de trabajo alcanzable en comparación a los robots de cadena cinemática abierta [4]. Ejemplos de esta estructura son el robot Delta diseñado por Clavel [5] que presenta tres grados de libertad o el robot H4 propuesto por Pierrot [6] que ofrece un nuevo grado de libertad.

Robots con esta estructura resultan valiosos para operaciones donde la velocidad y la precisión sobre objetos pequeños son características críticas, como las de re-posicionamiento de objetos (*pick and place*) [7], se hace entonces pertinente el estudio del desempeño de estrategias de control para alcanzar rendimientos óptimos en términos de posición, velocidad y aceleración en el seguimiento de trayectorias.

Por esto se realiza la comparación de la estrategia de control PID frente al control CTC en un prototipo experimental de robot H4 desarrollado para esta investigación. Dentro del análisis comparativo se plantean diferentes trayectorias y cambios en parámetros dinámicos evaluando el desempeño y robustez de las estrategias de control bajo diferentes condiciones.

El documento es dividido en seis capítulos, un apartado de referencia y otro de anexos. En el primer capítulo se abordan las cuestiones teóricas que sustentan la investigación realizada, presentando el problema propuesto, las condiciones que lo rodean y el estado de avance tecnológico e investigativo de la robótica paralela. El capítulo concluye definiendo los objetivos planteados y la metodología a utilizar durante el trabajo.

El segundo capítulo presenta los antecedentes e investigaciones representativas para el estudio de los robots paralelos, comprendiendo: Definiciones, clasificaciones, aspectos mecánicos involucrados y sistemas de control para contextualizar las temáticas más importantes usadas en este trabajo.

En el capítulo número tres se realiza el análisis cinemático y dinámico de la estructura robótica paralela a implementar; describiendo aspectos como: La estructura, la geometría, la construcción de modelos matemáticos y el diseño de las estrategias de control a comparar.

En el capítulo cuatro se presenta el proceso de desarrollo del prototipo que se usará en las pruebas comparativas, describiendo su estructura, los elementos que lo componen, los protocolos de comunicación, el diseño electrónico y el diseño eléctrico. También incluye la implementación del sistema robótico deseado: el ensamblaje, los sistemas de control y la interfaz de usuario.

El capítulo cinco muestra los resultados obtenidos tras la implementación de las estrategias de control PID y CTC sobre el prototipo desarrollado. En este capítulo, también se desarrolla el análisis comparativo de las estrategias de control para las trayectorias deseadas, así como las pruebas de robustez para dar respuesta a los objetivos planteados.

En el capítulo seis, se parte del análisis de resultados expuesto en el capítulo anterior para presentar las conclusiones que dan cierre al presente trabajo de grado. De forma complementaria se presentan trabajos a futuro que son considerados de interés para la continuación de la línea de investigación.

Por último el apartado de anexos se encuentra dividido en dos secciones (A y B). La sección A contiene información detallada sobre los elementos que componen al robot para facilitar la replicación de la estructura desarrollada; planos, métodos de fabricación, parámetros de impresión, etc. La sección B describe el ajuste del modelo geométrico del robot usando un modelo 3D computarizado simulado a través de la herramienta CoppeliaSim.

CAPÍTULO 1

GENERALIDADES

Contenido del capítulo

1.1. Planteamiento del problema	4
1.2. Estado del arte	5
1.2.1. Aplicaciones de los robots paralelos	5
1.2.2. Principales controladores utilizados en robótica paralela	12
1.3. Objetivos	13
1.3.1. Objetivo general	13
1.3.2. Objetivos específicos	13
1.4. Metodología	13

1.1. Planteamiento del problema

Actualmente sectores como electrónica, alimentos, farmacia, empaques, entre otros, requieren operaciones de selección y colocación de objetos (*pick-and-place*) para la inspección, clasificación y manipulación de productos usualmente pequeños y de poco peso [8]. Estas operaciones requieren de precisión y de velocidad, características muy demandadas en el sector industrial y difíciles de alcanzar de manera simultánea por un robot de estructura serial, ya que para estos robots, el incremento de la velocidad de operación acarrea una pérdida en la precisión de desplazamiento, haciendo a los robots de cinemática paralela alternativas llamativas para este tipo de aplicaciones [7].

Entre los diferentes diseños de robots paralelos, se tiene el robot delta elaborado por Clavel [5], que ha servido como base para toda una familia de robots dedicados a aplicaciones de alta velocidad. Dentro de esta familia se puede encontrar el robot H4 propuesto por Pierrot [6], que a diferencia del Delta posee un grado de libertad adicional, proporcionando de este modo tres DoF en traslación y uno en rotación, suficiente para la mayoría de tareas de selección y colocación de objetos [9].

El incremento de las investigaciones publicadas alrededor de la robótica paralela ha incrementado el interés en este tipo de robots, sin embargo no todas las áreas que giran alrededor de este tipo de estructuras robóticas han sido abordadas. Temáticas como el análisis del modelo cinemático o el espacio del trabajo han sido investigadas profundamente como se observa en [10][11][12] y [13]. En cambio temáticas relacionadas con la calibración, el control o la implementación en diferentes operaciones [7], han dado paso a incertidumbres investigativas e industriales acerca del rendimiento de distintos controladores. En investigaciones publicadas acerca del robot H4 se ha observado que los controles más estudiados para este robot son el PD, que muestra un buen control de la velocidad pero con problemas en el seguimiento de trayectorias [11], el PID, que entrega un buen desempeño en el control de la aceleración [14] y por último el CTC con mejores resultados en el seguimiento de trayectorias [15]. No obstante es necesario profundizar los estudios sobre la eficiencia de los robots H4 en tareas como el reposicionamiento de objetos, el cual no depende de una sola característica como la velocidad, la aceleración o el seguimiento de la trayectoria, sino de la combinación de múltiples variables.

Es importante analizar el desempeño de las estrategias de control como un conjunto de características, ya que cada una presenta ventajas y desventajas en su implementación, influyendo en el comportamiento final del robot. Por ende, en este trabajo se pretende hacer el análisis del desempeño de dos modelos de control, PID y CTC sobre un robot paralelo H4 en seguimiento de trayectoria para operaciones de *pick-and-place*, permitiendo dar respuesta a la siguiente interrogante ¿Cuál es la incidencia de la elección de las estrategias de control PID y CTC en el desempeño de un robot H4 al momento de realizar operaciones de *pick-and-place*?

1.2. Estado del arte

El avance exponencial de la tecnología ha permitido grandes avances en la robótica, esto se debe en gran parte al aumento de la capacidad de cómputo y a las características atractivas de los robots en el entorno industrial, como la disminución de costos de mano de obra, el aumento de la precisión, el incremento de la productividad, una mayor flexibilidad y la realización de trabajos repetitivos o peligrosos [4].

En el campo de la robótica se distinguen principalmente dos arquitecturas: serial y paralela. La primera es la más difundida y es la que se aplica en la mayoría de manipuladores industriales, no obstante desde inicios de los años 80's los robots de arquitectura paralela se ven como una alternativa a los robots de estructura serial [16].

Los robots paralelos son usados cada vez mas en distintas aplicaciones. Interés dado por las características de su mecanismo como: alta precisión, rigidez, velocidad y gran capacidad de carga. Sin embargo presentan algunos inconvenientes como su espacio de trabajo reducido y sus cinemáticas y dinámicas complejas; sin llegar a ser motivo suficiente para que los robots paralelos dejen de ser implementados en diferentes campos [4].

1.2.1. Aplicaciones de los robots paralelos

El número de aplicaciones de los robots paralelos es muy grande, por lo que se pueden encontrar en diferentes campos como la medicina, la industria, la simulación, entre otros [17].

Dentro del campo de la medicina se pueden encontrar robots paralelos en aplicaciones como el robot diseñado para cirugías oculares [18], el cual consiste en un robot miniatura de cinco grados de libertad compuesto de enlaces y articulaciones prismáticas, universales y de rótula. Este fue desarrollado para eliminar la membrana limitante interna durante la cirugía vitreo-retiniana [19] con un control maestro-esclavo que permite la réplica de la mano del cirujano ajustándola para filtrar los movimientos temblorosos de la mano. Ver figura 1.1.

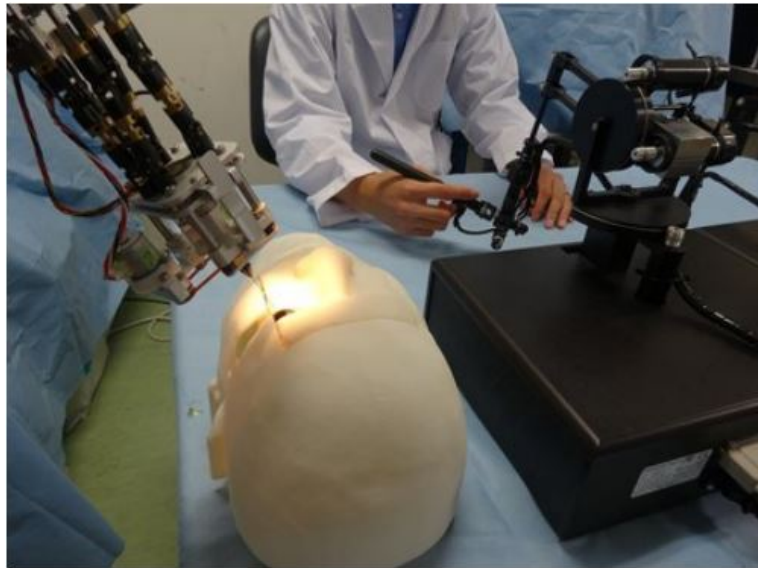


Figura 1.1: Robot paralelo para cirugía ocular [18]

Otra aplicación muy importante de los robots paralelos en la medicina es en el campo de la rehabilitación. Por ejemplo en [20], se propone un robot paralelo esférico de 3 grados de libertad para neuro-rehabilitación de tobillo-pie basado en el robot esférico Agile Eye [21] como se muestra en la figura 1.2, el cual proporciona ejercicios terapéuticos activos y pasivos, basado en tres lógicas de control: compensación dinámica, regulador basado en la admisión de movimiento y un control de posición puro para la movilización pasiva continua.

Para rehabilitación en pacientes con problemas del equilibrio se han desarrollado robots paralelos como [22], donde se diseña y se analiza una estructura robótica de tres grados de libertad para estudios posturales dinámicos (ver figura 1.3). Este robot se caracteriza por tener un espacio de trabajo angular con movimientos de cabeceo, alabeo y guiña lo bastante precisos para este tipo de estudios donde se necesita perturbaciones multiaxiales.

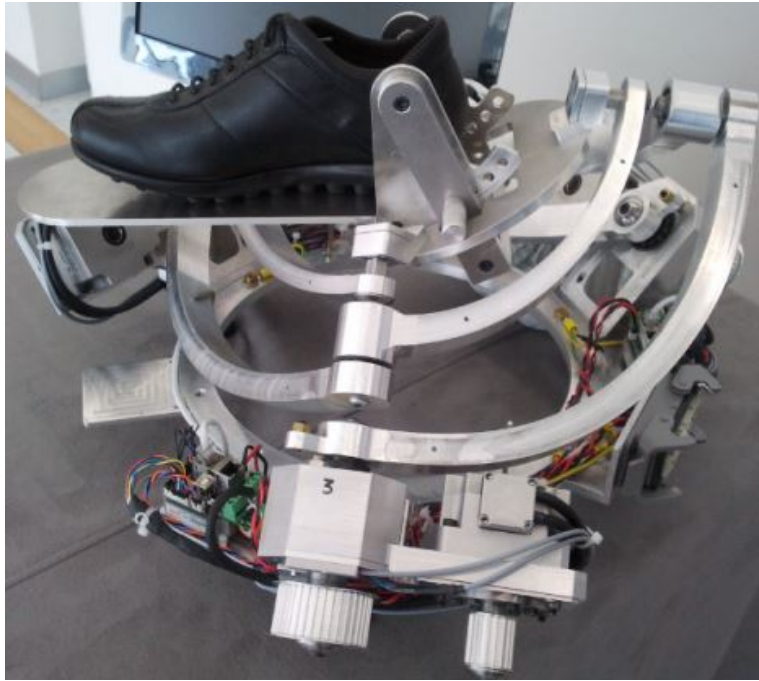


Figura 1.2: Robot paralelo esférico de 3 grados [21]

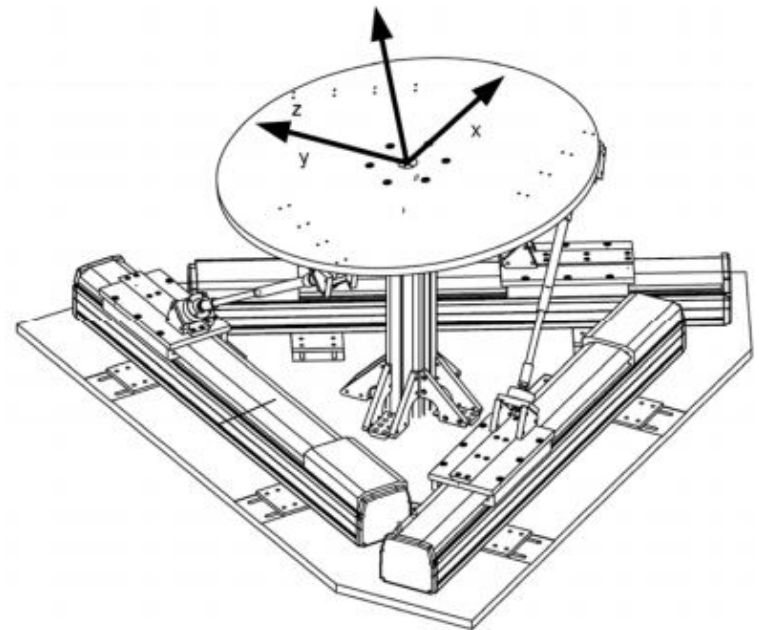


Figura 1.3: Robot para estudios posturales dinámicos [22]

En el campo industrial, uno de los robots paralelos que más ha tenido impacto es el robot Delta [5], siendo más aprovechado en operaciones de re-posicionamiento de objetos para las industrias de envasado y de embalaje [23]. No obstante, en tiempos más recientes se tienen otras variaciones de este robot que añaden un grado de libertad adicional como el robot

Quattro elaborado por Adept Technologies [24], el robot H4 [6], el robot Veloce de la empresa Pentarobotics [25], entre otros (ver figuras 1.4, 1.5 y 1.6). En el 2005 se presentó el diseño de un nuevo robot paralelo denominado Par4 dedicado a tareas de selección y colocación de objetos, partiendo de la arquitectura del robot H4 y mejorando características como su velocidad y aceleración [26]. En las pruebas que se realizaron al prototipo propuesto, logró alcanzar aceleraciones de hasta 13G implementado un controlador PID clásico.



Figura 1.4: Sysmac delta [27]



Figura 1.5: Robot Quattro [24]



Figura 1.6: Robot veloce [25]

Las estructuras robóticas paralelas o mecanismos cinemáticos paralelos también tienen aplicación en centros de mecanizado, debido principalmente a la presencia de unas mejores prestaciones a la hora de trabajar con materiales de gran dureza en comparación a los robots con estructura serial [28]. Por ejemplo Xie et al. [29], desarrollan una estructura robótica paralela para el mecanizado de piezas que presenta tres grados de libertad; dos de ellas traslacionales

y una rotacional, siendo capaz de mecanizar sobre cinco de las seis caras de un cubo en una sola configuración como se puede observar en la figura 1.7.

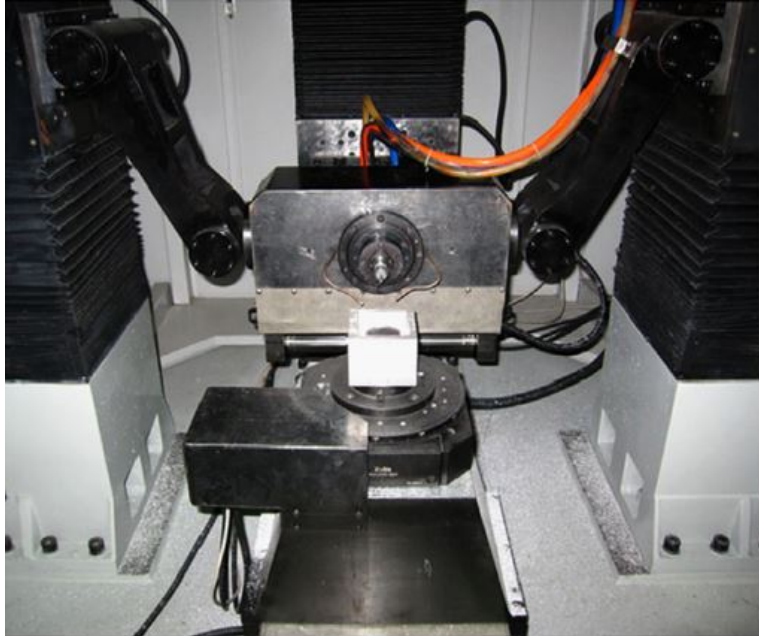


Figura 1.7: Robot paralelo para mecanizado de piezas [29]

Recientemente se están usando las estructuras paralelas en el diseño de piezas en impresión 3D como en [30], donde se presenta el desarrollo de un robot paralelo compuesto por cinco eslabones, que se encuentran unidos por articulaciones rotacionales para hacer impresiones 3D en plástico (ver figura 1.8) usando la metodología de diseño QFD (*Desarrollo de la función de la calidad*) que considera el diseño estructural, el diseño de control lógico y el cálculo del coste de fabricación.

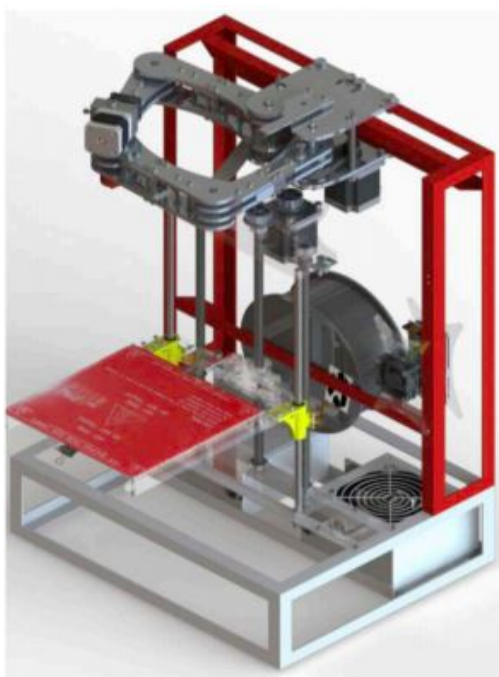


Figura 1.8: Robot paralelo para impresión de piezas en 3D [29]

En la actualidad el proceso de desarrollo de robots paralelos es activo y válido, un ejemplo es el robot DeltaX [31], que se presenta como una alternativa de código abierto, desarrollo adaptativo y fácil accesibilidad para el sector académico e industrial.

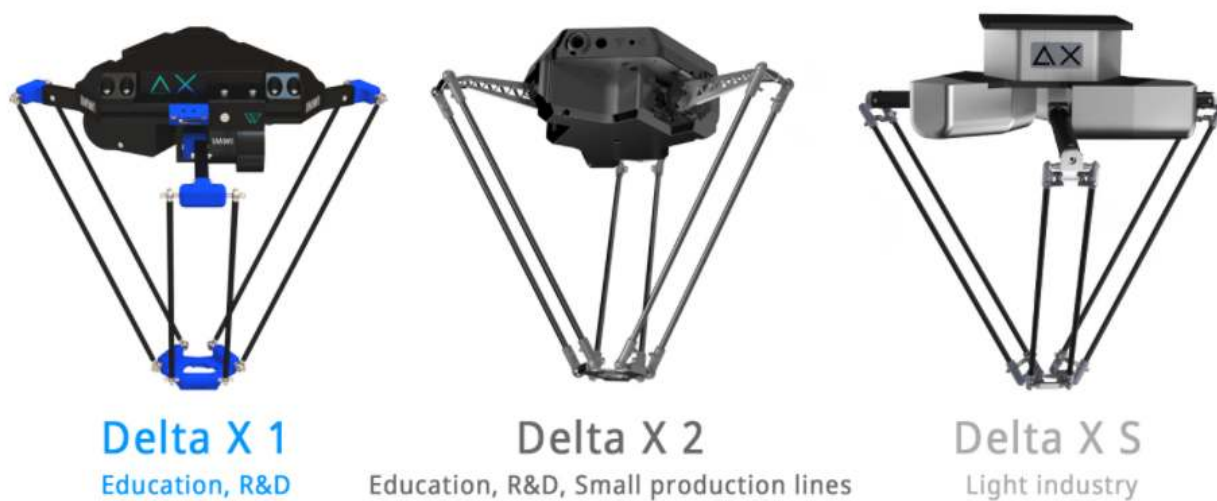


Figura 1.9: Robot DeltaX [31]

1.2.2. Principales controladores utilizados en robótica paralela

Tradicionalmente se ha abordado el control de movimiento de los robots con estrategias como el PID que tiene una gran presencia en el sector industrial [1]. Sin embargo, esta estrategia desaprovecha características como las altas velocidades de los robots paralelos al introducir vibraciones en estado transitorio e inexactitudes en el estado estacionario [32]. En el esfuerzo por establecer un control con capacidad de abordar gran parte de los aspectos de funcionamiento de un sistema robótico se han desarrollado opciones que toman en cuenta el modelo dinámico del sistema como el CTC (*control por torque computado*) que se ha extendido por considerarse una estrategia confiable y precisa, especialmente en robótica paralela [7].

Para desarrollar un control que considere el modelo dinámico del sistema se han desarrollado investigaciones como el trabajo de M. Farhadmanes et al. [33]. Dicho trabajo calcula el modelo cinemático y dinámico a un robot paralelo planar manipulador en forma de estrella. Se monta sobre una plataforma en forma de triángulo equilátero con uniones prismáticas a los lados, permitiendo de 3 grados de libertad; Su modelo se formula por medio del método lagrangiano. Todo es validado con el software Simmechanics y es usado también para diseñar estrategias de control basadas en el modelo del sistema como el control CTC.

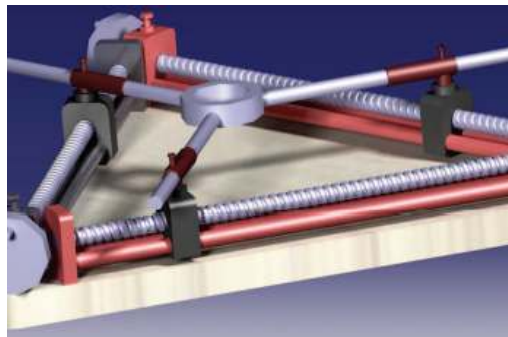


Figura 1.10: Robot paralelo planar [33].

También en estudios como el de A. Vivas y P. Poignet [15], se compara la aplicación de un control predictivo funcional contra un control por torque calculado sobre muestras experimentales para el robot H4 a partir del modelo. El estudio concluye que las dos estrategias de control son muy similares excepto en caso de desajuste del modelo donde el controlador CTC satura las entradas de torque en el robot.

P. Bengoa et al. [7], han implementado una variante del controlador CTC denominado CTC extendido estable sobre un robot manipulador paralelo tipo delta, que a diferencia del CTC clásico que usa solamente información de las articulaciones activas, hace una sensorización adicional en algunas articulaciones pasivas, presentando mejores resultados frente al control clásico CTC como: mayor robustez, mejor rendimiento del controlador y reducción del error del seguimiento de trayectorias.

Considerando las investigaciones encontradas sobre robots paralelos y particularmente sobre los robot H4 [11] [9] [34], se observó que muchas se centran en la comparación de características como la velocidad, la precisión y la aceleración con diferentes estrategias de control. No obstante, la comparación de estas características individuales no abarcan la totalidad de la información en cuanto al desempeño de la estrategia de control al realizar operaciones como re-posicionamiento de objetos en robots paralelos. Decidiendo desarrollar un estudio para comparar el desempeño de las estrategias de control CTC y PID en trayectorias para operaciones de *pick-and-place* desarrolladas por un robot H4. Se pretende dar un aporte a la comunidad científica acerca del desempeño e implementación de estas estrategias de control en robots paralelos cuando son usados en tareas industriales y al mismo tiempo dar un aporte a la Universidad del Cauca en materia de robótica paralela.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo general

- Comparar el desempeño de los controladores PID y CTC aplicados a un prototipo de robot paralelo H4 usado en operaciones de *pick-and-place*.

1.3.2. Objetivos específicos

- Implementar las estrategias de control CTC y PID sobre un robot paralelo H4.
- Evaluar el desempeño de las estrategias de control PID y CTC aplicado al robot H4 para el seguimiento de una trayectoria de pick-and-place considerando precisión, velocidad y aceleración.
- Determinar la robustez de las estrategias de control PID y CTC aplicando variaciones en los valores nominales de los parámetros involucrados en el sistema.

1.4. Metodología

- Fase 1: Diseñar un prototipo de robot paralelo H4 a partir de un modelo matemático.
 - Obtener los modelos matemáticos de robot H4.
 - Definir parámetros del robot H4.
 - Construir estructura con implementación hardware del prototipo del robot paralelo H4.
 - Determinar los dispositivos hardware necesarios para el control del robot H4.

- Implementar los dispositivos hardware de control en la estructura del robot paralelo H4.
- Fase 2: Implementar la estrategia de control PID y CTC sobre un prototipo de robot H4.
 - Diseñar el controlador PID.
 - Diseñar el controlador CTC.
 - Simulación de los controladores en Matlab/Simulink.
 - Implementar los controladores CTC y PID en el robot H4.
- Fase 3: Evaluar el desempeño de las estrategias de control PID y CTC.
 - Definir las trayectorias para el análisis de desempeño de los controladores.
 - Implementar experimentalmente las trayectorias definidas para los controladores PID y CTC.
 - Analizar comparativamente del desempeño de los controladores PID y CTC.
- Fase 4: Evaluar la robustez de las estrategias de control CTC y PID.
 - Definir los disturbios a implementar en el sistema.
 - Implementar los disturbios seleccionados para el sistema.
 - Analizar comparativamente los resultados obtenidos tras los disturbios aplicados sobre los controladores PID y CTC.
- Fase 5: Documentación.
 - Redacción de monografía y artículo para publicación.
 - Elaboración de anexos.

CAPÍTULO 2

MARCO TEÓRICO

Contenido del capítulo

2.1. Definición de robótica	16
2.2. Clasificación de robots	16
2.2.1. Clasificación de robots por generación	17
2.2.2. Clasificación según ISO	18
2.3. Robots manipuladores	19
2.3.1. Definición de robot manipulador	19
2.3.2. Componentes de los robots manipuladores	19
2.3.3. Clasificación de robots manipuladores	20
2.4. Teoría básica de mecanismos para robots	27
2.4.1. Definición de mecanismo	27
2.4.2. Fundamentos de mecanismos	28
2.4.3. Tipos de elementos y pares cinemáticos	28
2.4.4. Criterio de Grübler	31
2.4.5. Engranajes	32
2.5. Mecánica de robots	34
2.5.1. Cinemática de robots	35
2.5.2. Dinámica de robots	37
2.6. Control de robots manipuladores	38
2.6.1. Control PID	39
2.6.2. Control por torque calculado	41

En este capítulo se abordarán los conceptos, el marco referencial y las consideraciones teóricas relacionadas al control de robots H4 en aplicaciones de automatización industrial para el desarrollo de la investigación en posteriores capítulos.

2.1. Definición de robótica

La primera aparición de la palabra robótica viene dada en el año 1921 proveniente de la obra teatral *rosam's Universal Robots* del novelista Karel Capek, donde el término toma un significado de fuerza del trabajo o servidumbre [35]. Sin embargo la palabra robótica es dada por el escritor de ciencia ficción Isaac Asimov como "*la rama de la tecnología dedicada al diseño y construcción de robots, combinando diversas disciplinas como la mecánica, la electrónica, matemática, informática y la física.*" [36].

El surgimiento del robot en sí mismo, se da gracias a la fusión de dos tecnologías: el control numérico y los teleoperadores. La tecnología de teloperadores fue desarrollada tras la segunda guerra mundial y una de sus primeras funciones era el manejo de sustancias radioactivas, en cambio el control numérico computarizado (*C.N.C.*) fue desarrollado para la fabricación de piezas de aviones debido a la necesidad de una alta precisión en las maquinas que fabricaban las partes de los aviones [37].

Entre las diferentes definiciones que hoy en día se tienen de la palabra robot, la que provee la Robots Institute of America (RIA) señala que "Un robot es un manipulador multifuncional reprogramable diseñado para mover materiales, partes, herramientas o dispositivos especializados a través de movimientos programados para la ejecución de una variedad de tareas". Dicha definición es dada en el año de 1980 y refleja a su vez los avances tecnológicos de la época [2].

2.2. Clasificación de robots

Al abordar la clasificación de robots se encuentra una amplia variedad de usos y aplicaciones en este sector debido a la amplia acogida de la robótica como alternativa de solución en diversos campos de acción.

Actualmente es frecuente encontrar adjetivos adicionados al término robot para especificar con mejor detalle sus características, aplicaciones o sectores industriales en los que se involucran. Por esto, organizaciones como el CEA (*Comité Español de Automática*) listan una gran

variedad de robots en uso actual [38]. Esta gran diversificación de robots ha dado paso al planteamiento de diferentes clasificaciones y definiciones para su estudio y comprensión.

2.2.1. Clasificación de robots por generación

Es una clasificación planteada por Barrientos et al. [39] que se fundamenta en el momento tecnológico en el cual aparece un robot para su clasificación, dicha clasificación muestra los cambios generacionales en hitos que dieron lugar a avances significativos en las capacidades de los mismos, entendiendo que cronológicamente la primera generación se extiende desde el comienzo de la robótica hasta los años ochenta, la segunda generación se desarrolla en los años ochenta y la tercera generación está desarrollándose actualmente representando el presente y el futuro cercano de la robótica industrial.

- Primera generación: Repite la tarea programada secuencialmente. No toma en cuenta las posibles alteraciones de su entorno.

- Segunda generación: Adquiere información limitada de su entorno y actúa en consecuencia, para localizar, clasificar y detectar esfuerzos.

- Tercera generación: Su programación se realiza mediante el empleo de un lenguaje natural. Posee capacidad para la planificación automática de tareas.

Otra aproximación generacional es la ofrecida por Knasel [40]. Donde se establecen cinco generaciones (ver Cuadro 2.1) y a pesar de haber sido planteadas en 1986, representan un buen seguimiento a los hitos históricos que han tenido lugar en el campo de la robótica en las últimas décadas.

Generación	Nombre	Tipo de control	Grado de movilidad	Usos más frecuentes
1. ^a (1982)	Pick & place	Fines de carrera, aprendizaje	Ninguno	Manipulación, servicio de máquinas
2. ^a (1984)	Servo	Servocontrol, trayectoria continua, progr. condicional	Desplazamiento por vía pintura	Soldadura
3. ^a (1989)	Ensamblado	Servos de precisión, visión, tacto, prog. off-line	AGV Guiado por vía	Ensamblado, desbarbado
4. ^a (2000)	Móvil	Sensores inteligentes	Patas y ruedas	Construcción y mantenimiento
5. ^a (2010)	Especiales	Controlados con técnicas de IA	Andante y saltarín	Uso militar y uso espacial

Tabla 2.1: Clasificación por generación [39]

2.2.2. Clasificación según ISO

La ISO (*Organización internacional de normalización*) define un robot como: “Mecanismo accionado, programable en dos o más ejes con un grado de autonomía, moviéndose dentro de su entorno para realizar las tareas previstas”, aclarando que incluye el sistema de control y la interfaz del sistema de control [41].

Bajo esta definición, la ISO concibe también dos clasificaciones de robots acorde a su aplicación prevista que se especifican como:

- Robot industrial: Manipulador de tres o más ejes, con control automático, reprogramable y multipropósito, que puede ser fijo en su lugar o móvil para su uso en aplicaciones de automatización industrial, incluyendo el manipulador con sus respectivos actuadores y el controlador, incluido el control de aprendizaje y cualquier interfaz de comunicación (hardware y software) así como cualquier eje adicional integrado que se aplica a tareas de automatización industrial que incluyen pero no se limitan a manufactura, inspección, empaquetado y ensamblaje.
- Robot de servicio: Robot que desarrolla tareas útiles para humanos o equipos, excluyendo las aplicaciones de automatización industrial.

2.3. Robots manipuladores

A finales de los años ochenta el campo de aplicación de la robótica se concentró principalmente en la industria manufacturera a cargo de manipulación de piezas o herramientas específicas, causando que los robots que trabajaban en estas áreas fueran denominados robots industriales manipuladores. Se encuentran firmemente instalados en el sector industrial, con un amplio desarrollo, una amplia oferta de parte de los fabricantes y una demanda creciente [39]. Convirtiéndose en una característica estándar sobre todo en las líneas de ensamble modernas en tareas como la soldadura, la pulverización, operaciones de recogida y colocación, la perforación, el corte y la elevación [42].

2.3.1. Definición de robot manipulador

Autores como Rosado y Domínguez-López [43] definen el término como: “Un robot manipulador es un manipulador automático servo-controlado, reprogramable, polivalente, capaz de posicionar y orientar piezas siguiendo trayectorias variables”. De forma paralela el estándar ISO 8373:1998 define a un robot manipulador como: “*Manipulador de 3 o más ejes, con control automático, reprogramable, multiaplicación, móvil o no, destinado a ser utilizado en aplicaciones de automatización industrial. Incluye al manipulador (sistema mecánico y accionadores) y al sistema de control (software y hardware de control y potencia)*” [44].

Ambas definiciones establecen que un robot es un manipulador reprogramable, no obstante la norma ISO especifica que debe ser de tres o más ejes, que debe tener un sistema mecánico con accionadores y un sistema de control que incluya software, hardware y fase de potencia. Cabe destacar que la misma norma ISO define el término de reprogramable como: “*Aquellos en los que los movimientos programados o las funciones auxiliares pueden cambiarse sin modificación física*” [44], permitiendo excluir aquellos manipuladores de control tipo todo-nada como los neumáticos o los controlados normalmente por sistemas lógicos como PLCs (*Programmable Logic Controller*) [39].

2.3.2. Componentes de los robots manipuladores

Generalmente los robots manipuladores industriales están compuestos por los siguientes elementos [2]:

- **Articulaciones:** Uniones que conectan y dan un movimiento entre dos eslabones consecutivos que hacen parte del robot, los movimientos ofrecidos por las articulaciones puede ser prismáticos (lineal) o rotacionales.

- **Actuadores:** Son los elementos que producen el movimiento en las articulaciones. Usualmente estos pueden ser servomotores, elementos electrónicos, neumáticos o hidráulicos.
- **Sensores:** Permiten obtener información del estado interno o externo del robot en variables como velocidad angular, posición, fuerza, condiciones ambientales, entre otros. Lo anterior permite que el robot tenga mejor versatilidad y autonomía en la realización de diferentes tareas. Particularmente en los robots industriales los encoders presentan un uso extendido ya que permiten obtener información sobre la posición relativa o absoluta de la articulación.
- **Sistema mecánico:** Es una secuencia de eslabones o enlaces rígidos conectados por medio de articulaciones, comúnmente un robot manipulador se compone de un brazo para la movilidad, una muñeca para la destreza y un extremo final para realizar la tarea.
- **Consola de control:** Compuesta de un sistema electrónico con una etapa de potencia que permite el control de los diferentes actuadores del robot. Así mismo, la consola de control contiene los algoritmos de control que se encuentran dentro del sistema operativo del robot, permitiéndole ejecutar tareas dentro de las restricciones mecánicas que pueda presentar el sistema referente a su propia estructura y/o a la interacción con su entorno.

2.3.3. Clasificación de robots manipuladores

Una de las formas de clasificar los robots manipuladores es según su estructura cinemática, según este criterio pueden ser de tipo serial, formados por cadenas cinemáticas abiertas; de tipo paralelo, con cadenas cinemáticas cerradas y los mixtos, formados por la unión de cadenas cinemáticas cerradas y abiertas.

2.3.3.1. Robots seriales

Por su estructura similar a un brazo humano, los robots seriales son los más usados en la industria y están formados por cadenas de enlaces rígidos unidos por juntas para formar un hombro, un codo y una muñeca. La principal ventaja que tienen estas estructuras robóticas es su gran espacio de trabajo con respecto al volumen ocupado, no obstante sus cadenas cinemáticas abiertas presentan una baja rigidez estructural, haciendo que en cada enlace el error de posición se vaya acumulando. Adicionalmente presentan una relación de masa/carga útil alta con su consecuente baja eficiencia en cuanto a carga útil [45].

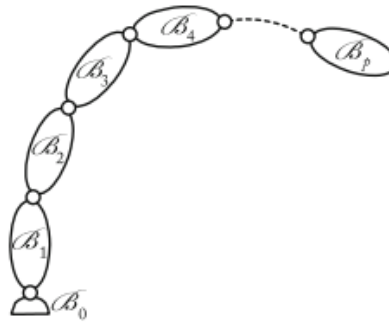


Figura 2.1: Estructura general de robots seriales [46]

2.3.3.2. Robots paralelos

También conocidos como manipuladores paralelos o máquinas cinemáticas paralelas cuando son usados en operaciones de maquinado, pueden definirse como un mecanismo de cadena cinemática de lazo cerrado, donde el actuador se encuentra conectado a la base a través de un determinado número de cadenas cinemáticas independientes en paralelo [28] [45].

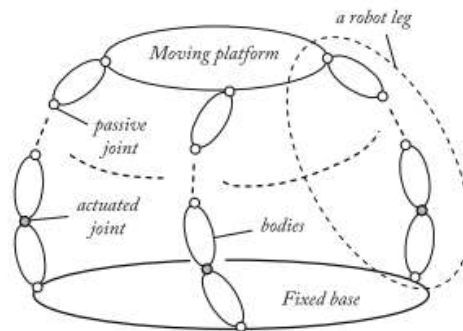


Figura 2.2: Estructura general de robots paralelos [46]

A comparación de un robot serial, cada miembro de un robot paralelo tiende a ser más simple y más corto, adicionando beneficios para el robot como:

- Alta rigidez debido a la distribución de cargas en todos los miembros del robot y a la disminución en los torques ocasionados por el movimiento de las masas.
- Facilidad para alcanzar altas velocidades y aceleraciones, consecuencia de los bajos momentos de inercia en las partes móviles de la estructura.

- Mayor grado de precisión por la compensación de errores por parte de la estructura, contrario a los robots seriales donde los errores se acumulan.
- Capacidad de obtener valores más altos de fuerza en el actuador debido al trabajo conjunto de los distintos actuadores trabajando en paralelo.

A pesar de sus múltiples fortalezas, no se encuentran exentos de puntos débiles, en particular se ven afectados en su limitado espacio de trabajo y a las singularidades que se presentan [45] [47].

Para la clasificación de los robots paralelos comúnmente se recurre a dos métodos de clasificación considerando la movilidad del efector final y las características de transmisión de movimiento.

- Según la movilidad del efector final encontramos robots paralelos con movilidad completa, es decir aquellos robots con seis grados de libertad y robots paralelos con movilidad reducida, incluyendo a los sistemas con menos de seis grados de libertad, siendo los últimos generalmente más baratos y simples; posicionándose como una alternativa importante en muchas de las tareas que no requieren la implementación de 6 grados de libertad [47].
- Según las características de transmisión del movimiento encontramos robots acoplados y desacoplados. En los robots desacoplados se presenta una arquitectura que permite realizar movimientos en específicos de forma independiente por un cierto orden de actuadores resultando en cálculos de desplazamiento, evaluaciones de espacio de trabajo, planificación de movimientos y control más sencillos. Por otro lado, en los robots acoplados los grados de libertad del movimiento de salida se encuentran siempre interrelacionados a través de dependencias con uno o múltiples actuadores y resultando en un incremento en la complejidad analítica [47] [28].

Debido a su uso en variedad de sectores como dispositivos de posicionamiento en sistemas donde se requiere de alta precisión: simuladores de vuelo, robots quirúrgicos, de rehabilitación, para tareas de *pick and place* o para maquinado de alta velocidad se ha diseñado y desarrollado una gran cantidad de robots paralelos, pero debido a su acogida relativamente reciente, solo unos pocos modelos han logrado ser comercializados exitosamente [28].

Algunos de los modelos de robots paralelos más utilizados en la actualidad son:

- Robot Delta:

Desarrollado en la escuela politécnica *École Polytechnique Fédérale de Lausanne* por el

profesor emérito Clavel [5], se trata de la primera alternativa de solución implementado en la industria, su equivalente más cercano en los robots seriales es el robot SCARA debido a su capacidad de realizar posicionamiento en el espacio cartesiano junto a una rotación, el robot Delta se pensó como un robot capaz de manipular objetos de bajo peso altas velocidades, aquí el posicionamiento está a cargo de sus miembros y su rotación está a cargo de una pierna central de tipo cardán, siendo capaz de lograr aceleraciones de hasta 30g y velocidades de hasta 10m/s con una capacidad de carga de entre 10g y 1kg.

Su particularidad radica en las tres uniones entre la base y la placa móvil del mismo, estas uniones se componen de un paralelogramo cada una, ofreciendo la capacidad de balancear el centro de masa en cada una de ellas y uniéndose a la base mediante pares o juntas universales. Su debilidad parte de la necesidad de la cadena cinemática central tipo cardán debido a las altas fuerzas de torsión que esta debe soportar [28] [48] [45].

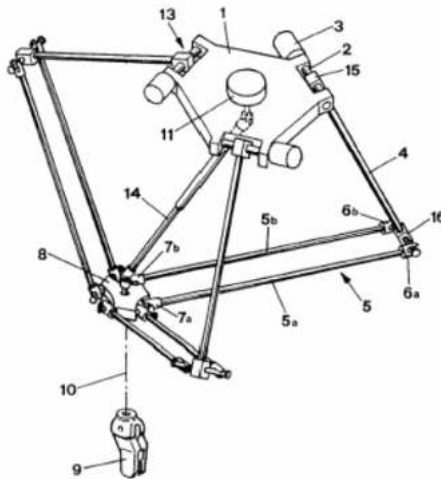


Figura 2.3: Delta robot patentado por Clavel [5]

- Robot paralelo conducido por cables:

Surge ante la necesidad de incrementar el espacio de trabajo de un robot paralelo de cuerpos rígidos e incluso producir mayores aceleraciones que las posibles para los últimos mencionados. Conductores de cables alimentados por electricidad reemplazaron los actuadores presentes en otros modelos de robots paralelos conduciendo inmediatamente a un incremento en el espacio de trabajo, logrando llegar a aceleraciones de hasta 40g. Sin embargo, las limitaciones de los robots paralelos conducidos por cables se presentan sobre todo porque los cables solamente son capaces de operar bajo tensión y no bajo presión, haciendo necesaria la consideración de este aspecto en el diseño del robot para ajustar los parámetros o considerar la adición de actuadores redundantes que permitan

garantizar que los cables siempre se encuentren en tensión.

Entre las aplicaciones de los robots paralelos conducidos por cables se encuentra el posicionamiento de cámaras móviles sobre distintos escenarios, telescopios de última generación, radiotelescopios o grandes equipos de telecomunicaciones [45].

- Robot H4

La presentación de esta nueva familia de robots paralelos se encuentra en [6], donde se muestra la capacidad de proporcionar 3 grados de libertad posicionales y un grado de libertad rotacional en un eje determinado, en el artículo se describe la alternativa de solución planteada a los grados de libertad requeridos, las relaciones de posición, de velocidad y algunas de las distintas configuraciones posibles de actuadores y geometría en la estructura de estos robots.

Como antecedente y referencia conceptual, se toma el robot delta explicado anteriormente en una configuración clásica lineal donde cada cadena cinemática es manipulada por un actuador fijo en la base y el posicionamiento se realiza mediante tres cadenas cinemáticas compuestas estructuralmente por una varilla cada una, unidas por juntas de bola en cada extremo para introducir nuevos grados de libertad internos al sistema y proporcionando la capacidad de rotar sobre su eje generando un movimiento no deseado; para evitar este movimiento se explica la introducción de un par de varillas paralelas en cada cadena cinemática.

Basado en las mejoras desarrolladas para esta versión del robot delta pero con la intención de adicionar el cuarto grado de libertad rotacional mediante otra cadena cinemática paralela, se plantea la familia H4 en [14], el artículo muestra el concepto general de un robot H4 como un mecanismo basado en cuatro cadenas cinemáticas independientes que se encuentran entre la base y la plataforma móvil donde cada cadena cinemática es manipulada por un actuador fijo en la base. Su esquema estructural se muestra en la figura 2.4 donde las juntas se encuentran representadas por rectángulos siendo la letra P una junta prismática, la letra R una junta rotacional, la letra U una junta universal pasiva y los enlaces entre juntas son representadas por líneas.

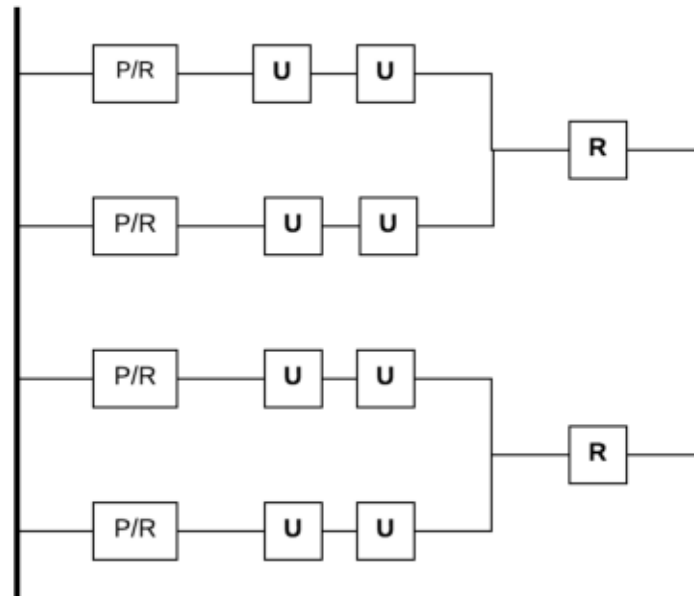


Figura 2.4: Esquema general del robot H4 [34]

En el anterior esquema se representan las distintas configuraciones posibles que puede tomar la cadena cinemática: Una cadena P-U-U o una cadena R-U-U. Como resultado dan lugar a distintas configuraciones simétricas o asimétricas como se muestra en [6].

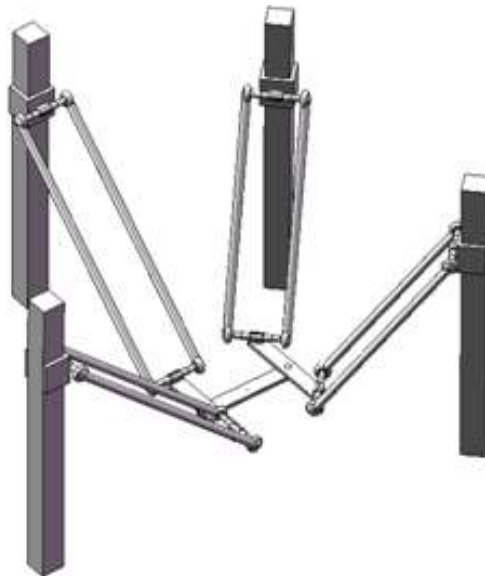


Figura 2.5: Robot H4 con 4 juntas prismáticas [34]



Figura 2.6: Robot H4 con 4 juntas rotacionales [34]

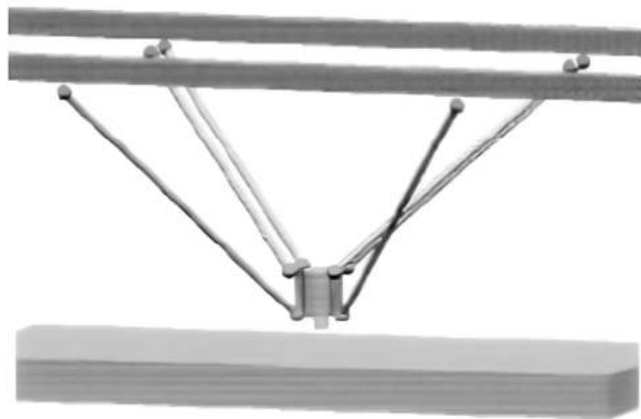


Figura 2.7: Robot H4 con 4 juntas prismáticas y configuración asimétrica [34]

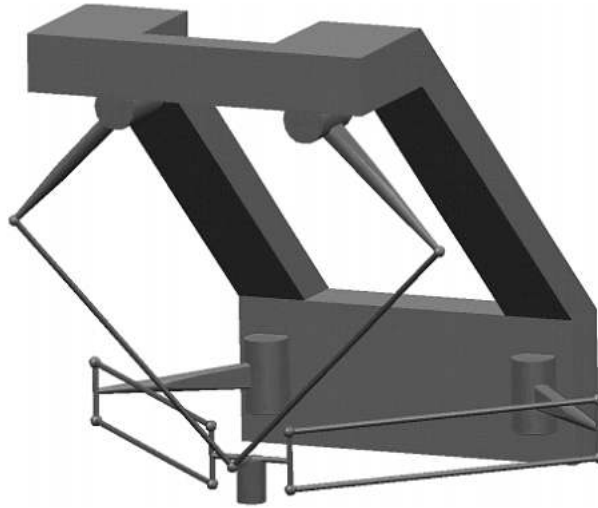


Figura 2.8: Robot H4 con 4 juntas rotacionales y configuración asimétrica [34]

Debido a la estructura planteada, los robots H4 son capaces de lograr alta precisión de posicionamiento y rotación, de forma conjunta a grandes magnitudes de velocidad y aceleración. Encontrando lugar en aplicaciones de pick and place y maquinado, siendo comercializado bajo distintas patentes como el robot Quattro desarrollado por Adept Technologies y comercializado por la empresa OMRON [24] o el robot Veloce de la empresa Pentarobotics [25].

2.4. Teoría básica de mecanismos para robots

Desde un punto de vista mecánico, un robot es un sistema conformado por un órgano terminal que permite manipular o transformar objetos y una estructura articulada cuyo objetivo es llevar el órgano terminal a una posición y/o orientación deseada [49]. Por tal motivo es de vital importancia el estudio de los diferentes mecanismos que componen un sistema robótico antes de realizar los análisis matemáticos del sistema.

2.4.1. Definición de mecanismo

Un mecanismo es la combinación de cuerpos que se disponen de forma que producen un trabajo y que permiten transmitir niveles de fuerza/momento considerables. Los mecanismos se componen por *elementos* que en su mayoría tienen la posibilidad de tener movimiento exceptuando uno denominando *elemento fijo* que a su vez están compuestos por partículas

que se desplazan relativamente una con respecto a otras, al ser movimientos tan pequeños son despreciados y se toma al elemento como un *solido rígido* [50].

2.4.2. Fundamentos de mecanismos

Para describir los mecanismos se toma en cuenta diferentes conceptos que permiten estudiar y determinar sus comportamientos, sus características y su composición estructural como: [50]:

- Elementos: Son las barras, eslabones o miembros que componen un mecanismo que poseen un movimiento relativo con respecto a los otros elementos que conforma el mecanismo y que mantienen una discontinuidad de tipo físico.
- Pares cinemáticos: Se le denomina pares cinemáticos a las uniones entre los elementos y permiten algunos movimientos entre ellos, al tiempo que impiden otros.
- Cadenas cinemáticas: Son el conjunto de elementos móviles unidos por pares cinemáticos donde no existen elementos fijos, sin embargo en el concepto mecanismo se define como una cadena cinemática con uno o mas elementos fijos.
- Movilidad: la movilidad de una cadena cinemática hace referencia al número de parámetros necesarios para definir completamente su posición, este concepto es análogo al concepto de *grados de libertad* pero referido a mecanismos.

2.4.3. Tipos de elementos y pares cinemáticos

Los elementos y pares cinemáticos de un mecanismo pueden ser clasificados atendiendo a diferentes características, estas clasificaciones pueden llegar a ser numerosas, por lo que se nombraran algunas.

2.4.3.1. Clasificación de elementos

Los elementos de un mecanismo pueden ser clasificados por [51]:

- Por su naturaleza los elementos pueden ser rígidos sin presencia de movimientos relativos; unirrigidos como cables, cadenas, correas etc.; y flexibles, experimentando deformaciones comparables a las de sus propios movimientos.
- Por el número de pares se pueden clasificar en monarios, que contienen un solo par cinemático; binarios, con dos pares cinemáticos hasta n-arios, con n grados de libertad.

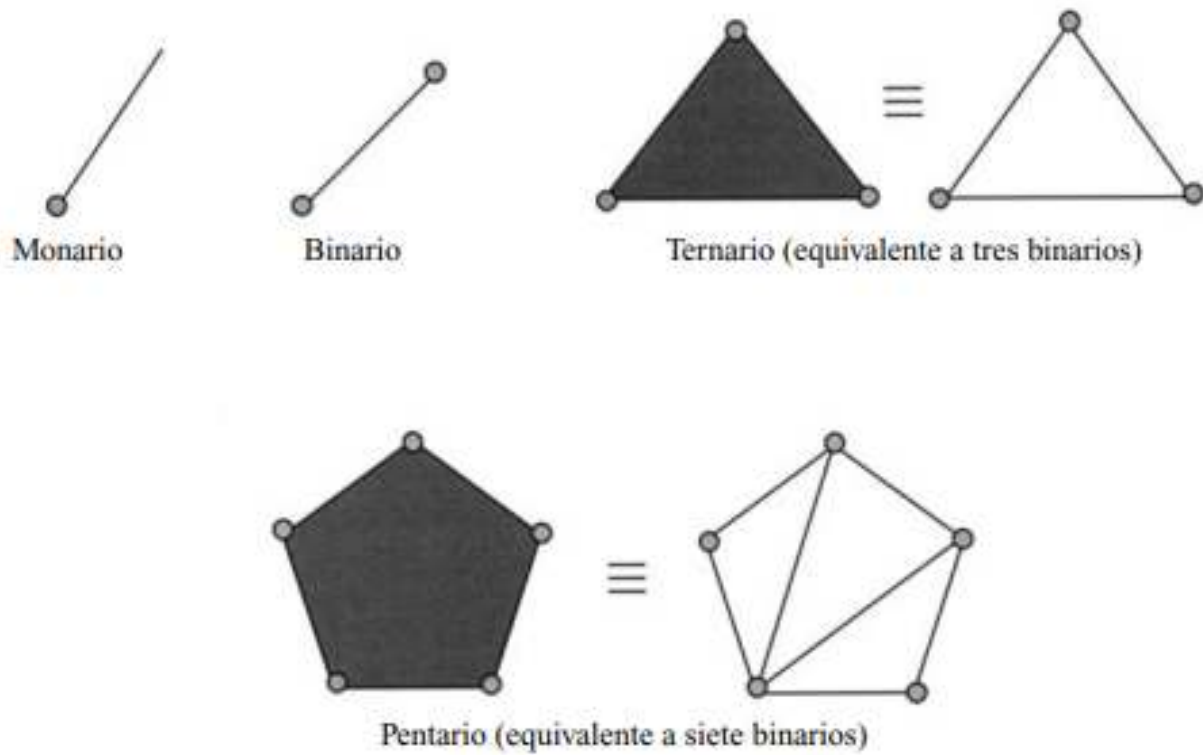


Figura 2.9: Clasificación de elementos por número de pares [51].

- Por el tipo de movimiento los elementos pueden ser clasificados en manivelas, que son aquellos elementos que giran alrededor de un eje; balancines, los cuales oscilan alrededor de un eje fijo; y bielas, que giran alrededor de un eje instantáneo de rotación.

2.4.3.2. Clasificación de pares cinemáticos

Los pares cinemáticos pueden ser clasificados por el número de elementos, por tipo de cierre, por clase, entre otros [51].

- Por número de elementos conectados al par cinemático los pares cinemáticos pueden ser binarios, terciarios, cuaternarios y n -arios.



Figura 2.10: Clasificación de pares por número de elementos [51].

- Por tipo de cierre los pares cinemáticos pueden ser en cierre de forma, donde la forma garantiza la unión entre elementos; cierre de fuerza, es la fuerza la que mantiene en contacto o unión la superficies de los elementos; y cierre de cadena, donde la disposición de elementos garantiza el contacto entre superficies.

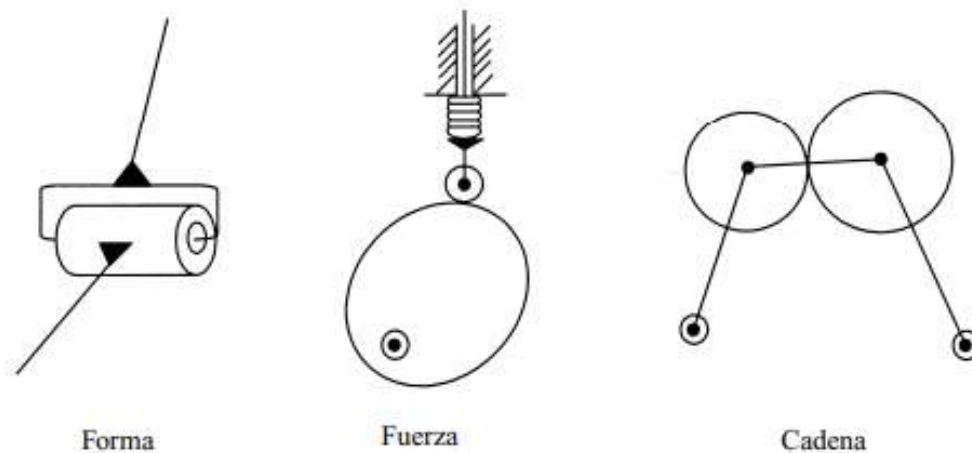


Figura 2.11: Clasificación de pares por tipo de cierre [51].

- Por clase los pares cinemáticos pueden clasificarse en clase I, Clase II, Clase III, ..., Clase V dependiendo de los grados de libertad que permita dar el par cinemático entre los elementos que se unen a él. Los pares más utilizados en la construcción de mecanismos son los de clases I, II y III, los cuales representan los grados de libertad en el plano. Los pares se pueden observar en la tabla 2.2.

PARES	N.º de GDL resgringidos	DENOMINACIÓN DEL PAR	
CLASE I	5	 Par de rotación	 Par prismático
CLASE II	4	 Par cilíndrico	 Par de leva
CLASE III	3	 Par esférico	 Par plano

Tabla 2.2: Pares mas usados en mecanismos por clase [51].

2.4.4. Criterio de Grübler

El criterio de Grübler permite determinar el número de grados de libertad de un mecanismo a partir de sus elementos y pares cinemáticos que contenga. Este criterio establece dos expresiones en particular, la primera de ellas para mecanismos que se encuentran restringidos a un plano, y la segunda para mecanismos tridimensionales [50][51].

2.4.4.1. Criterio de Grübler en el plano

El criterio de Grübler en el plano sugiere que un número de N elementos que no contengan pares cinemáticos unidos tienen $3N$ grados de libertad en el plano. Al momento de fijar uno de los elementos los grados de libertad que contenga el mecanismo será de $3(N-1)$.

Al momento de formar un mecanismo los N elementos se unen a través de pares cinemáti-

cos que restringen sus movimientos de acuerdo a la clase de par cinemático. Así, un par de clase I restringirá dos grados de libertad permitiendo un solo movimiento y el par de clase II restringirá un grado de libertad permitiendo dos movimientos, dando como resultado la ecuación 2.4.1, donde P_I representa los pares de clase I que tiene el mecanismos y P_{II} los pares cinemáticos de clase II.

$$G = 3(N - 1) - 2P_I - P_{II} \quad (2.4.1)$$

2.4.4.2. Criterio de Grübler en el espacio o criterio de Malishev

El criterio de Grübler en el espacio o también conocido como criterio de Malishev considera que un sólido en el espacio posee seis grados de libertad. Donde los pares de clase I, restringen cinco grados de libertad, los de clase II cuatro grados de libertad y así sucesivamente hasta el par cinemático de clase V que restringe un solo grado de libertad, por tanto la ecuación que describe dicho criterio viene dado por 2.4.2.

$$G = 6(N - 1) - 5P_I - 4P_{II} - 3P_{III} - 2P_{IV} - P_V \quad (2.4.2)$$

2.4.5. Engranajes

Los engranajes son un tipo de elementos importante en el diseño de mecanismos que tienen la capacidad de transmitir movimientos rotacionales entre ejes, que a diferencia de otros transmisores de par de torsión como las cadenas o poleas tienen una alta eficiencia de transmisión de par de torsión, un menor volumen, una mayor resistencia y mayor durabilidad.

2.4.5.1. Transmisión de movimiento por engranajes

Los engranajes se pueden definir como ruedas dentadas que al acoplarse con otras más pequeñas transmiten rotación y potencia de un eje a otro manteniendo una razón de velocidades rotacionales. Esta transmisión se da gracias al empuje de los dientes del engranaje impulsor que ejerce una componente de fuerza perpendicular al radio del engranaje [52].

2.4.5.2. Clasificación de engranajes

Los engranajes se dividen principalmente en tres clases las cuales son [52]:

- Engranajes de ejes paralelos: Son los más comunes y simples, estos conectan ejes paralelos para transferir potencia y pueden encontrarse de tipo rectos y helicoidales.

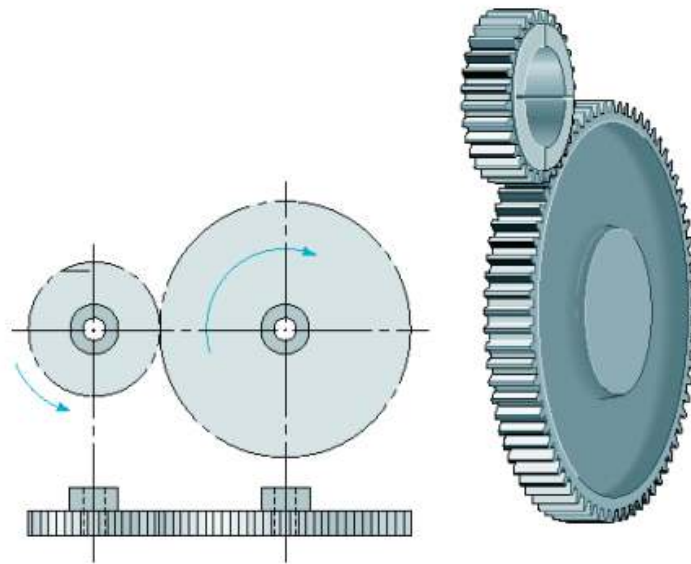


Figura 2.12: Engranaje recto [52].

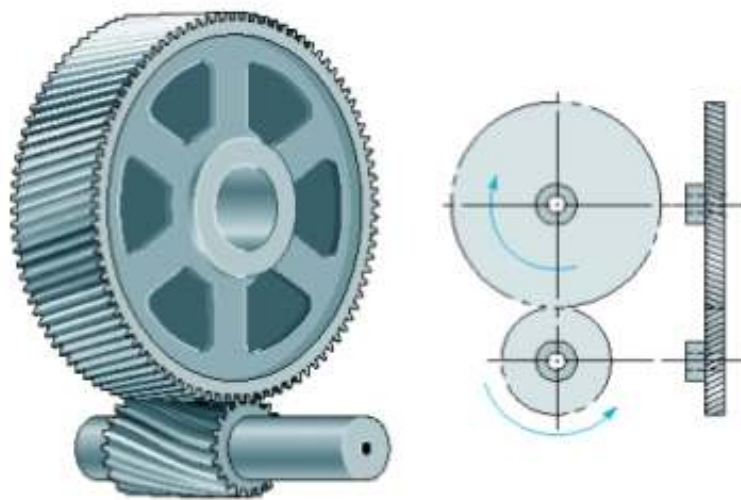


Figura 2.13: Engranaje helicoidal [52].

- Engranajes no paralelos coplanares: Se caracterizan por transmitir la potencia alrededor de una esquina, compuestos de ejes en posición coplanar pero no paralela.

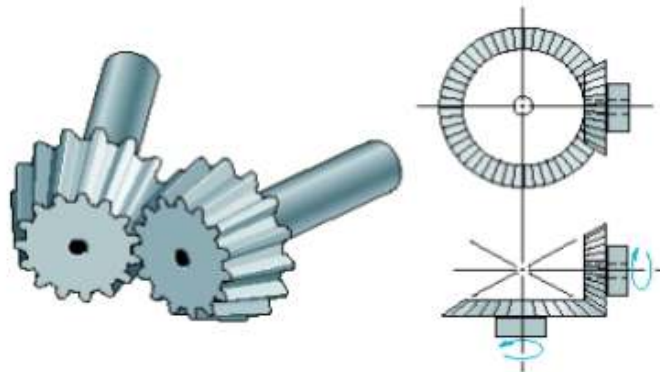


Figura 2.14: Engranaje no paralelos coplanares [52].

- Engranajes no paralelos no coplanarios: Son los más complejos y difíciles de construir, por lo que el precio de estos es alto en comparación a otros engranajes. Sus principales ventajas son su alta relación de reducción y la posibilidad de bloqueo de movimiento, sin embargo presentan un alto desgaste por tener una mayor superficie de contacto siendo principalmente usados para cargas bajas, un ejemplo es el un tornillo sin fin-corona que se observa en la figura 2.15.

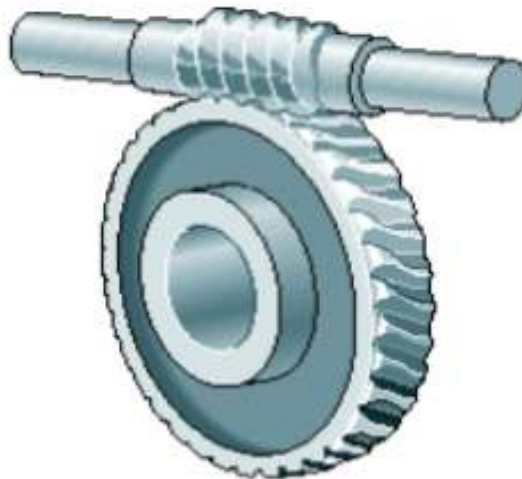


Figura 2.15: Tornillo sin fin corona [52].

2.5. Mecánica de robots

La mecánica es la rama de la física que estudia el estado de reposo o movimiento de los cuerpos sometidos a la acción de una fuerza. Entre los diferentes campos de investigación de

la mecánica se encuentra la mecánica vectorial de cuerpos rígidos, una formulación específica de la mecánica clásica y que tiene dos enfoques: estática y dinámica. El enfoque estático estudia los cuerpos en reposo y la dinámica estudia los cuerpos en movimiento y a su vez se divide en dos partes: Cinemática y la cinética [53].

En muchos casos la terminología en cuanto al estudio cinético también es denominada estudio dinámico, por lo tanto en este trabajo se denominará al estudio cinético del robot como estudio dinámico [10].

2.5.1. Cinemática de robots

La cinemática estudia los movimientos del robot como una función del tiempo con respecto a un sistema de referencia, especialmente estudia las relaciones entre la posición y la orientación del extremo final con los valores que toman las coordenadas articulares considerando tanto la velocidad como la aceleración sin tomar en cuenta las fuerzas que intervienen en el sistema.

De acuerdo a lo anterior es posible considerar el estudio del análisis cinemático en tres partes: un análisis de posicionamiento y orientación, un análisis de velocidades y un análisis de aceleraciones [10].

2.5.1.1. Análisis de posicionamiento y orientación

El análisis del posicionamiento y orientación busca en todo momento determinar la localización de elemento final del robot pudiéndose abordar desde dos sentidos opuestos, dando lugar al planteamiento del problema cinemático directo e inverso.

- **Cinemática directa:** El problema a resolver de la cinemática directa es el conocer la posición y orientación del extremo final del robot con respecto a los valores de las articulaciones y los parámetros geométricos del robot. Además, proporciona a los robots manipuladores industriales elementos para analizar y diseñar el desplazamiento de trayectorias y la orientación de la herramienta u objeto que manipula el robot [2] [39]. Por ende es importante obtener un modelo matemático que proporcione información relativa a la localización del extremo del robot.

El modelo matemático necesario se conoce como modelo cinemático directo y utiliza las variables de las articulaciones que pueden ser leídas directamente por los sensores. Para el cálculo de dicho modelo se han abordado dos enfoques diferentes: Métodos geométricos y métodos basados en cambios de sistemas de referencia. Los primeros al ser métodos no sistemáticos son usados para estructuras simples con pocos grados de libertad, el

segundo basado en cambios de sistemas de referencia que permite la obtención de modelos matemáticos directos de los robots con “n” grados de libertad de una manera sistemática. Esto ha hecho que los métodos basado en cambios de sistemas de referencia sea uno de los métodos que mas se usa para la determinación de dicho modelo [39].

- Cinemática inversa: El problema de la cinemática inversa busca encontrar la configuración que debe tomar la estructura del robot para alcanzar una posición y orientación del extremo final [39]. Normalmente la resolución al problema de la cinemática inversa se puede lograr mediante enfoques analíticos y/o numéricos. El enfoque analítico presenta una ejecución rápida a la hora de procesar los cálculos, haciéndole apto para aplicaciones donde el problema de la cinemática inversa debe ser resuelto en tiempo real como por ejemplo en aplicaciones de soldadura en automóviles, sin embargo es un enfoque particular para cada cadena cinemática. A diferencia del anterior, el enfoque numérico presenta una solución más general que las técnicas analíticas a costa de un mayor consumo de procesamiento [42].

2.5.1.2. Análisis de velocidades

En la cinemática de un robot es importante conocer la relación entre las velocidades de las coordenadas articulares y las de posición/orientación del extremo, esta relación es definida por el modelo diferencial. Aquí el sistema de control del robot establece las velocidades articulares que debe imprimir a cada articulación para que se logre el desarrollo de una trayectoria temporal.

El modelo diferencial se concreta mediante el cálculo de la matriz jacobiana J , donde se relaciona el vector de velocidades articulares con otro vector de velocidades expresado en otro espacio definido, ya sea con las velocidades de la localización del extremo del robot, siendo esta la posición y orientación expresada en coordenadas cartesianas y ángulos de Euler $(\dot{x}, \dot{y}, \dot{z}, \dot{\phi}, \dot{\theta}, \dot{\psi})$ o con los vectores de velocidad lineal y angular $(V_x, V_y, V_z, W_x, W_y, W_z)$. La relación entre estas velocidades se obtiene e sentido directo o inverso a través de la matriz jacobiana directa y la jacobiana inversa.

$$\begin{bmatrix} V_x \\ V_y \\ V_z \\ W_x \\ W_y \\ W_z \end{bmatrix} = J \begin{bmatrix} \dot{q}_1 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \dot{q}_n \end{bmatrix} \quad (2.5.1)$$

La jacobiana directa permite conocer una expresión de las velocidades del extremo del robot a partir de los valores de las velocidades de cada articulación. Por otra parte, la matriz jacobiana inversa permite conocer las velocidades del extremo a partir de las articulares [39][10].

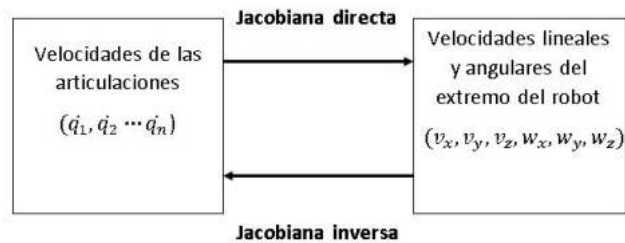


Figura 2.16: Jacobiana directa e inversa

Además de la relación entre las velocidades del robot, la matriz jacobiana también es de interés particular en el diseño mecánico, en el análisis de singularidades y en el diseño de controladores en el espacio de trabajo operacional [49].

La jacobiana inversa J^{-1} es equivalente a la traspuesta de su matriz de cofactores dividida entre su determinante. Por lo tanto, si para una determinada configuración del robot su determinante se hace cero, se dice que la matriz es singular y su inversa no puede ser calculada, lo cual supone un incremento infinitesimal de las coordenadas cartesianas y de forma contraria un incremento infinito de las coordenadas articulares.

Lo anterior es importante para no solicitar a los actuadores mover las cadenas cinemáticas hacia configuraciones singulares que desencadenen en trayectorias físicamente no solucionables por el sistema [39]. En casos como el de los robots paralelos estas configuraciones singulares también pueden ser dadas por sus articulaciones pasivas [10].

Las configuraciones singulares pueden ser clasificadas como [39]:

- Singularidades en los límites del espacio de trabajo: ocurren cuando el extremo del robot se encuentra en un límite interior o exterior del espacio de trabajo.
- Singularidades en el interior del espacio de trabajo: son aquellas que se presentan dentro de la zona de trabajo del robot y son producidas por el alineamiento de dos o más ejes de las articulaciones del robot.

2.5.2. Dinámica de robots

El objetivo del estudio dinámico de los robots es conocer la relación entre su movimiento y las fuerzas implicadas. Relaciones que se pueden obtener mediante el estudio del modelo dinámico que establece las relaciones matemáticas entre: Fuerzas, pares aplicados, longitudes, masas, inercias y la localización del robot por variables articulares o coordenadas del extremo final con sus respectivas derivadas: velocidad y aceleración.

La tarea de elaborar un modelo dinámico, puede en muchas ocasiones ser tediosa y compleja, llegando a ser omitida aún cuando es importante para simular los movimientos, para diseñar

los mecanismos necesarios, para evaluar la estructura, para dimensionar los actuadores o para el diseño y control de la dinámica del robot [39].

De forma general, el modelo dinámico más utilizado en el área de robótica para un robot de n grados de libertad esta dado por la siguiente ecuación [2]:

$$\tau = M(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + g(q) + f_f(\dot{q}, f_e) \quad (2.5.2)$$

En la ecuación 2.5.2 se puede observar la matriz de inercia denotada como $M(q)$ la cual es simétrica y definida positiva, la matriz de fuerzas centrípetas y de coriolis $C(q, \dot{q})$, el vector de fuerzas o pares gravitacionales $g(q)$ y el vector de fricción que incluye la fricción viscosa, de Coulomb y la fricción estática $f_f(\dot{q}, f_e)$.

De forma mas compacta autores como [54] simplifican aún más el modelo dinámico de un robot, omitiendo el vector de fricción como se puede observar en la ecuación 2.5.3 suponiendo que las uniones de los eslabones del robot no poseen fricción.

$$\tau = M(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + g(q) \quad (2.5.3)$$

2.6. Control de robots manipuladores

El control de robots manipuladores se ha convertido en una temática de interés en la comunidad científica, sobre todo en el diseño de sistemas de control por la gran cantidad de tareas que pueden desempeñar los robots manipuladores, no obstante necesitan de un alto desempeño y exactitud en los movimientos para el desarrollo de una tarea. Sugiriendo que el diseño de nuevos esquemas de control resulta complejo a la vez que necesario para aquellas aplicaciones que no pueden ser desarrolladas por algoritmos de control tradicionales.

En cuanto a coordenadas articulares de robots manipuladores, el problema general es el control de trayectoria o control de movimiento que consiste en determinar los pares que deben ser aplicados por los actuadores para que el sistema alcance una posición deseada en función del tiempo. El control de movimiento se encuentra en un crecimiento constante dando lugar al diseño de diferentes estrategias de control, demostrando mejor desempeño el control par calculado, el control PD+, el PD con compensación calculada y el PD con compensación. Controladores como el clásico PID son usados para el control de posición, el cual es un caso particular del control de movimiento para el que no hay una referencia variante en el tiempo sino un punto constante denominado *set point* [2]. Sin embargo, no se excluye al control PID del control de movimiento, de hecho, por su gran robustez y fácil implementación, es usado en la gran mayoría de robots manipuladores [54].

2.6.1. Control PID

Debido a las altas prestaciones ofrecidas a la gran mayoría de sistemas de control, los controladores PID son hoy en día los más usados en el área industrial. Una de sus grandes ventajas en comparación con otros controles es la capacidad de ofrecer un efectivo cumplimiento de la tarea de control aún desconociendo el modelo matemático que representa al sistema a controlar, especialmente usado en casos donde no es posible el uso de métodos de diseño de controladores analíticos[55].

Comúnmente los controladores como el PID son considerados como controles no basados en el modelo, debido a que explícitamente no involucran términos del modelo dinámico, sin embargo no es del todo cierto ya que posee parámetros de diseño cuyos valores numéricos se determinan en función del modelo del robot [54].

2.6.1.1. Características básicas del control PID

El algoritmo control PID se caracteriza por contar con tres términos de ganancia: proporcional, encargada de disminuir el error entre un estado deseado y el estado actual del sistema con la desventaja de crear oscilaciones; integral, que mediante la suma de áreas bajo la curva del error de posición disminuye el error de estado estacionario; y derivativa, que reduce las oscilaciones y cambios bruscos en la acción de control del sistema, logrando en conjunto una acción de control completa [2].

La figura 2.17 muestra el esquema general de un control PID sobre el modelo matemático de una planta $G_p(s)$ y la función de transferencia del controlador $G_c(s)$ dividida en sus tres acciones de control básicas: proporcional K_p , Integral K_i y derivativo K_d [55].

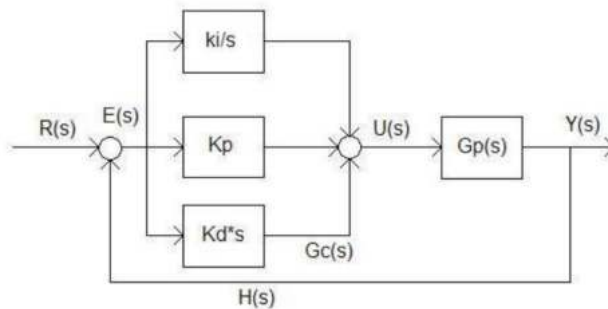


Figura 2.17: Esquema general PID [55].

El esfuerzo de control $U(s)$, está dado por:

$$U(s) = K_p e(s) + K_i e(s)/s + K_d e(s)s \quad (2.6.1)$$

Donde $K_p = K_c$, $K_i = 1/T_i$ y $K_d = T_d$ siendo K_c , T_i y T_d la ganancia proporcional, el tiempo integral del controlador y el tiempo derivativo del controlador respectivamente.

2.6.1.2. Control PID para robots manipuladores

El control PID aplicado al robots manipuladores industriales no difiere mucho del esquema general del control PID, como se muestra en la figura 2.18 presentada en [54], en el esquema de control se evidencian las tres acciones de control, además se observa que el sistema a controlar es realimentado no solo por la posición articular (q_d) del robot, sino también por la velocidad articular (\dot{q}_d), debido a que algunos robots cuentan con un sensor de velocidad, de no ser posible esa medición, puede ser estimada a partir de la medición de la posición ya sea mediante filtrado o por medio de observadores.

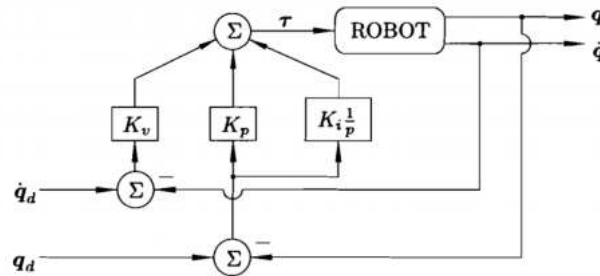


Figura 2.18: Esquema PID para un robot manipulador [54].

La ley de control PID se puede expresar de la siguiente manera:

$$\tau = K_p \tilde{q} + K_v \dot{\tilde{q}} + K_i \int_0^t \tilde{q}(\mu) d\mu \quad (2.6.2)$$

Autores como Reyes [56], agregan un término más al control PID denominado compensación de gravedad $g(q)$, este termino es necesario cuando los movimientos del robot se realizan en el plano vertical o en un espacio tridimensional. La ley de control resultante se muestra en la ecuación 2.6.3, en el caso de que el movimiento sea en plano horizontal, la energía potencial es constante esto implica que $g(q)$ es cero.

$$\tau = K_p \tilde{q} + K_v \dot{\tilde{q}} + K_i \int_0^t \tilde{q}(\mu) d\mu + g(q) \quad (2.6.3)$$

2.6.1.3. Sintonización de control PID

La sintonización o ajuste de parámetros es importante para que la respuesta del sistema siga las especificaciones dadas y se requiere de un conocimiento mínimo del efecto de las tres acciones que implementa el control PID.

Es frecuente que en la industria el ajuste de los parámetros PID se realice cuando el comportamiento de la planta o robot tenga cambios sustanciales. Para realizar un ajuste de parámetros, se recurre a técnicas analíticas y experimentales. Las primeras usan el modelo matemático de la planta para determinar los parámetros que mejor se ajustan al proceso, sin embargo, muchas veces el modelo matemático de la planta puede llegar a ser complejo y es necesario el uso de las técnicas experimentales como [55]:

- Ensayos de prueba y error.
- Sintonía experimental en lazo abierto.
- Sintonía experimental en lazo cerrado.
- Sintonía experimental con especificaciones frecuenciales.

2.6.2. Control por torque calculado

El modelo dinámico que representa el comportamiento de un robot manipulador suele ser no lineal en términos de las variables de estados como las posiciones y las velocidades angulares. No se busca decir que el controlador a usar deba ser no lineal, se busca un control no lineal que permite describir el sistema de control en lazo cerrado mediante una ecuación diferencial lineal, para satisfacer de forma global este objetivo se hace uso del control Par-Calculado o CTC (*control torque calculado*).

El esquema que describe el control Par-calculado se evidencia en la figura 2.19, como se observa el control CTC cuenta con términos de control tipo PD, no obstante este controlador no es de tipo lineal ya que las ganancias de posición y velocidad dependen del error de posición \tilde{q} . Además de contener las acciones derivativas y proporcionales de un control PD, el control torque calculado usa explícitamente las matrices $M(q)$, $C(q, \dot{q})$ y el vector $g(q)$, para obtener la ley de control representada por 2.6.4 [54].

$$\tau = M(q)[\ddot{q}_d + K_v\dot{\tilde{q}} + K_p\tilde{q}] + C(q, \dot{q})\dot{q} + g(q) \quad (2.6.4)$$

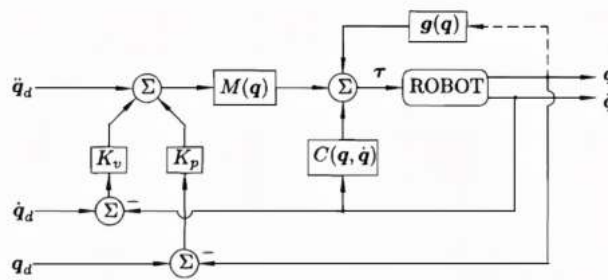


Figura 2.19: Esquema control CTC 2.6.4.

2.6.2.1. Linealidad en lazo cerrado

El uso explícito de las matrices que conforman el modelo dinámico del robot permite obtener una ecuación lineal en malla cerrada 2.6.5, que se obtiene reemplazando la acción de la ley de control τ expresada por 2.6.4 en la ecuación del modelo dinámico simplificado de un robot dada por la ecuación 2.5.3 [54].

$$M(q)\ddot{q} = M(q)[\ddot{q}_d + K_v\dot{\tilde{q}} + K_p\tilde{q}] \quad (2.6.5)$$

Como la matriz $M(q)$ es una matriz definida positivamente y además es invertible, la ecuación en lazo cerrado 2.6.5 se simplifica aún más, quedando una ecuación lineal (2.6.6) y autónoma, cuyas soluciones se obtienen en lazo cerrado.

$$\ddot{\tilde{q}} + K_v\dot{\tilde{q}} + K_p\tilde{q} = 0 \quad (2.6.6)$$

De esta manera se concluye las definiciones y conceptos involucrados a lo largo del documento y se da paso al siguiente capítulo donde se aplican varios de los conceptos y herramientas matemáticas anteriormente vistas para la construcción de modelos matemáticos y algoritmos de control de un robot paralelo H4.

CAPÍTULO 3

ANÁLISIS CINEMÁTICO, DINÁMICO Y DISEÑO DE CONTROLADORES

Contenido del capítulo

3.1. Descripción de la estructura paralela	44
3.2. Análisis geométrico de un robot H4	45
3.2.1. Análisis geométrico superior	46
3.2.2. Análisis geométrico inferior	48
3.3. Modelo cinemático inverso	50
3.4. Modelo cinemático directo	52
3.5. Matriz jacobiana	52
3.6. Estimación del volumen de trabajo	53
3.7. Modelo dinámico de robot H4	55
3.8. Diseño de controladores	57
3.8.1. Control PID para robot H4	57
3.8.2. Control CTC para robot H4	60

En este capítulo se describen los modelos geométricos, cinemáticos y dinámicos del robot paralelo H4, tomando como referencia el trabajo desarrollado por Vivas en [3] y los conceptos abordados en el capítulo anterior. También se detallada los diferentes modelos matemáticos y estructuras de control usados y adaptados para esta investigación.

3.1. Descripción de la estructura paralela

El robot H4 es un tipo de robot paralelo compuesto por cuatro cadenas cinemáticas independientes que se encuentran entre una base y una góndola [6], el concepto básico del robot H4 se ilustra en la figura 3.1, aquí se observan las juntas presentadas por rectángulos y los enlaces representados por líneas; las letras R y S representan el tipo de unión correspondientes a uniones rotacionales y a uniones esféricas respectivamente. Su diseño se caracteriza por tener los siguientes componentes: motores o actuadores, antebrazos, brazos o varillas, juntas esféricas y una base móvil también llamada góndola compuesta por dos barras laterales y una central [14] [57].

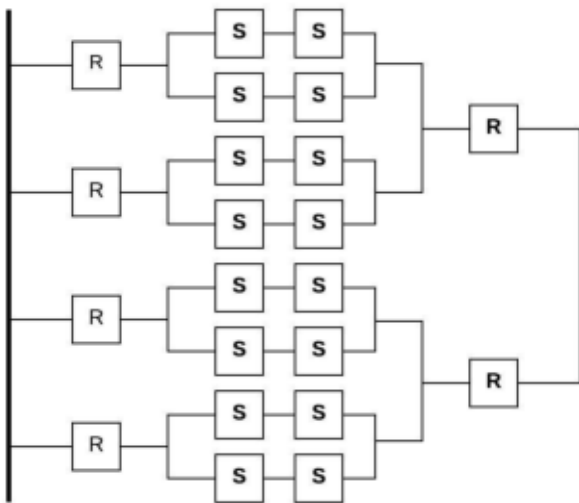


Figura 3.1: Diagrama descripción de juntas



Figura 3.2: Robot H4

3.2. Análisis geométrico de un robot H4

El análisis geométrico del robot H4 es importante para el cálculo de los diferentes modelos necesarios, proporciona las relaciones geométricas y los parámetros dimensionales que representan al robot. Para el correcto análisis del modelo se usó como referencia las diferentes representaciones que se muestran en las figuras 3.3, 3.4 y 3.5.

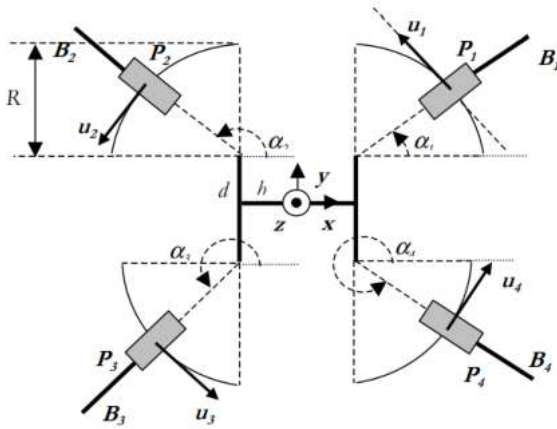


Figura 3.3: Disposición de motores [3]

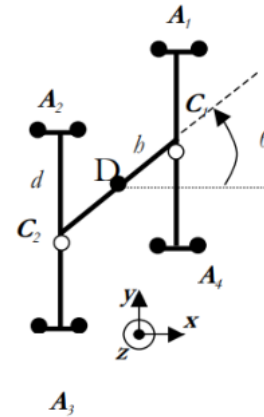


Figura 3.4: Góndola o base móvil [3]

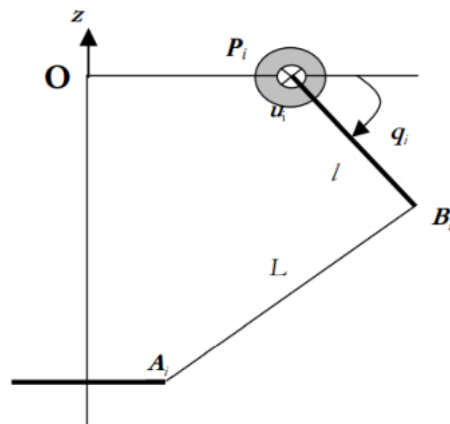


Figura 3.5: Vista lateral de robot H4 [3]

La figura 3.3 representa la disposición que tienen los motores, donde α_i representa el ángulo de los cuatro motores respecto a la góndola, d representa la longitud media de las barras laterales de la góndola, h la longitud media de la barra central de la góndola y R representa la ubicación de los motores con respecto a la góndola.

En la figura 3.4 se representa la H o góndola del robot H4, donde θ_i es el ángulo que forma la rotación de la góndola y D es la referencia del origen correspondiente a la H.

En la figura 3.5 se puede observar una vista lateral, correspondiente a uno de los brazos. O es el origen de referencia de la base fija del robot, q_i es el ángulo dado por el eje del motor, U_i son los vectores unitarios, los segmentos P_iB_i y A_iB_i representa los ante-brazos y brazos del robot respectivamente, L representa la longitud del brazo y l la longitud del ante-brazo.

Considerando las figuras mostradas anteriormente, se divide el análisis geométrico en dos partes: Análisis geométrico superior y Análisis geométrico inferior. La primera hace referencia a las relaciones geométricas entre la disposición de los motores y los antebrazos tomando el origen absoluto del robot O y la segunda parte hace referencia a las relaciones geométricas de la góndola tomando el origen D.

3.2.1. Análisis geométrico superior

Las relaciones presentes en la geometría superior del robot, el cual constituyen el origen absoluto O con cada uno de los antebrazos del robot es descrita por el siguiente vector:

$$OB_i = OP_i + P_iB_i \quad (3.2.1)$$

Como se observa el vector mostrado por la ecuación 3.2.1 depende estrictamente de los vectores que representan la geometría de los segmentos OP_i y P_iB_i .

El vector OP_i se calcula analizando las relaciones geométricas que forman la disposición de los motores desde el origen absoluto hasta el centro de cada uno los motores P_i , como se observa en las figuras 3.6, 3.7, 3.8, 3.9.

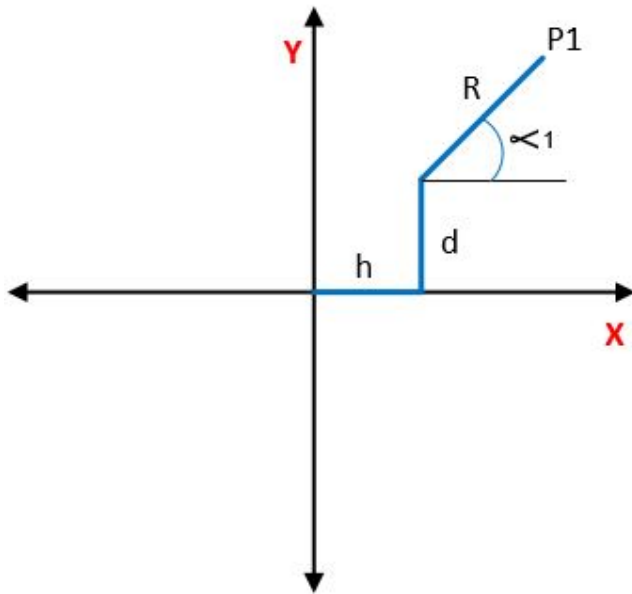


Figura 3.6: Cálculo del vector OP_1

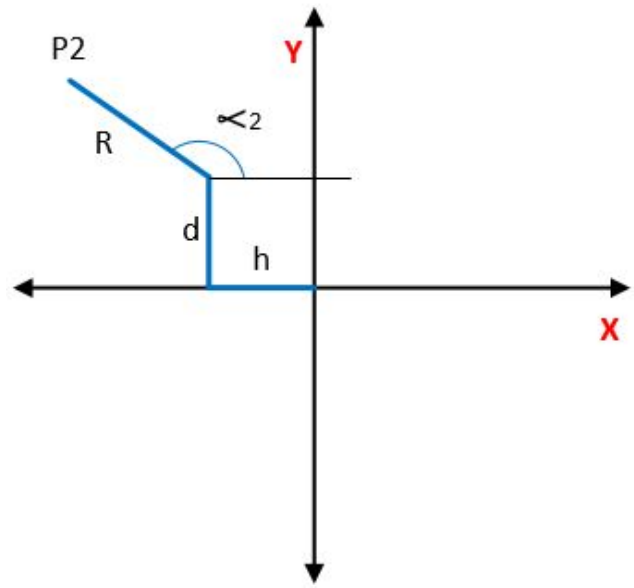


Figura 3.7: Cálculo del vector OP_2

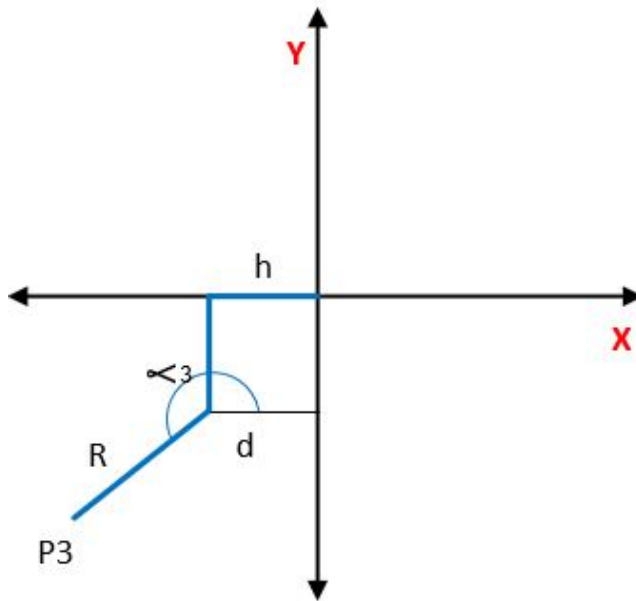


Figura 3.8: Cálculo del vector OP_3

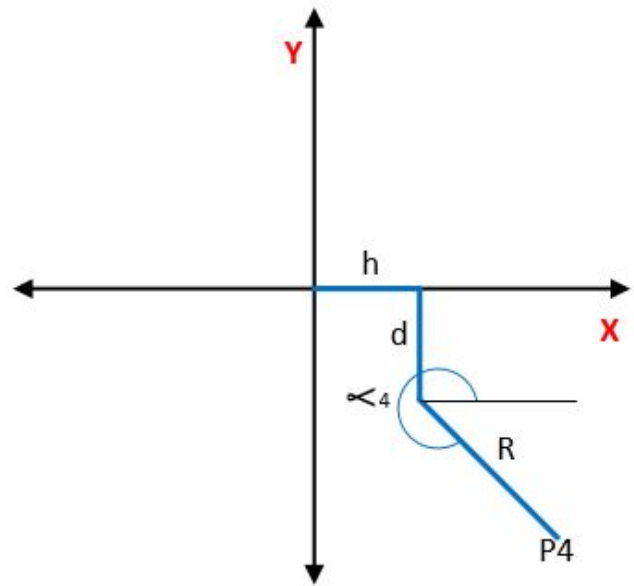


Figura 3.9: Cálculo del vector OP_4

Como resultado del análisis de cada una de las disposiciones tomadas por los motores con respecto al origen absoluto se obtiene los vectores $OP_{1,2,3,4}$ como se muestra a continuación:

$$OP_1 = \begin{bmatrix} h + R \cos \alpha_1 \\ d + R \sin \alpha_1 \\ 0 \end{bmatrix} \quad OP_2 = \begin{bmatrix} -h + R \cos \alpha_2 \\ d + R \sin \alpha_2 \\ 0 \end{bmatrix} \quad OP_3 = \begin{bmatrix} -h + R \cos \alpha_3 \\ -d + R \sin \alpha_3 \\ 0 \end{bmatrix} \quad OP_4 = \begin{bmatrix} h + R \cos \alpha_4 \\ -d + R \sin \alpha_4 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3.2.2)$$

El vector que representa el segmento $P_i B_i$ hace referencia a la relación geométrica que existe entre la disposición de los motores y los antebrazos del robot, por tanto se toma un análisis desde una vista superior (ver figura 3.10) y una vista lateral (ver figura 3.11).

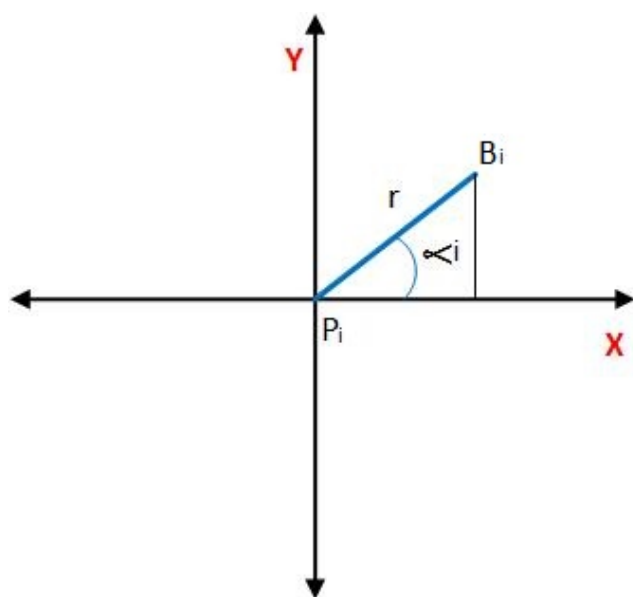


Figura 3.10: Vista superior

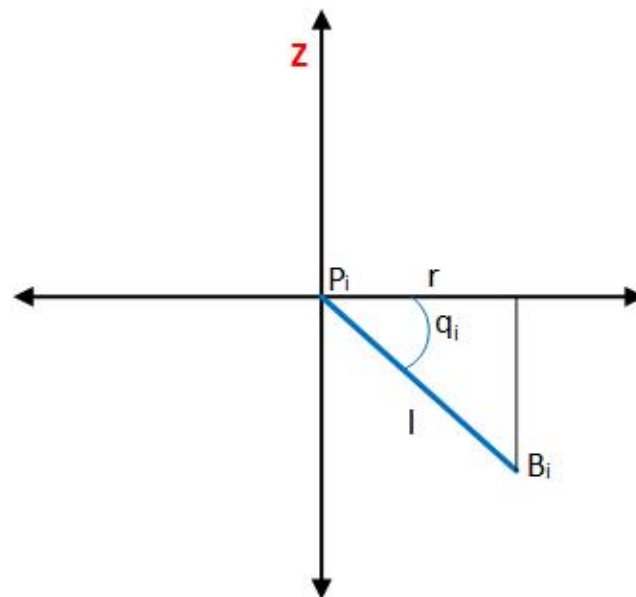


Figura 3.11: Vista lateral

El vector resultante del análisis de las anteriores representaciones cartesianas, dan como resultado el siguiente vector:

$$P_i B_i = \begin{bmatrix} l \cos q_i \cos \alpha_i \\ l \cos q_i \sin \alpha_i \\ -l \sin q_i \end{bmatrix} \quad (3.2.3)$$

3.2.2. Análisis geométrico inferior

En este análisis se construye el vector que contiene todas las relaciones geométricas de la H permitiendo unir el centro u origen O de la góndola con todos los brazos del robot, representado por la siguiente ecuación:

$$OA_i = OD + DA_i \quad (3.2.4)$$

Como puede verse en la ecuación 3.2.4, el vector OA_i depende del vector OD que representa el vector de coordenadas cartesianas en las cuales se va a desplazar el centro de la góndola D como se observa en la ecuación 3.2.5 y también depende del vector DA_i que representa las relaciones trigonométricas existentes entre el origen de la H y las uniones de cada brazo A_i

$$OD = \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} \quad (3.2.5)$$

Los vectores $DA_1, 2, 3, 4$ se calculan analizando la geometría de la góndola como se representa en las figuras 3.12, 3.13, 3.14, 3.15.

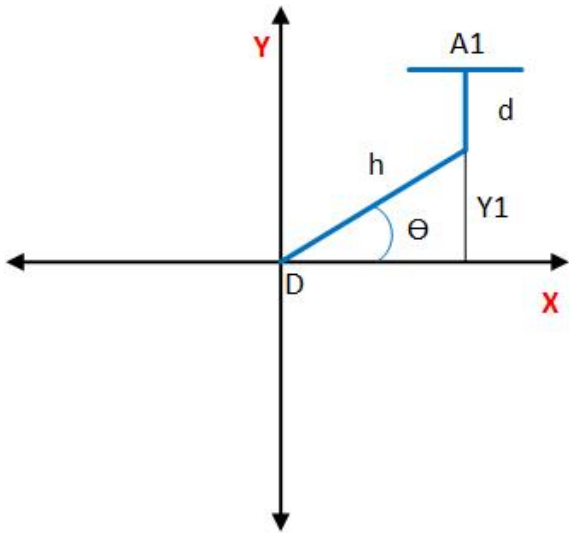


Figura 3.12: Cálculo de matriz DA_1

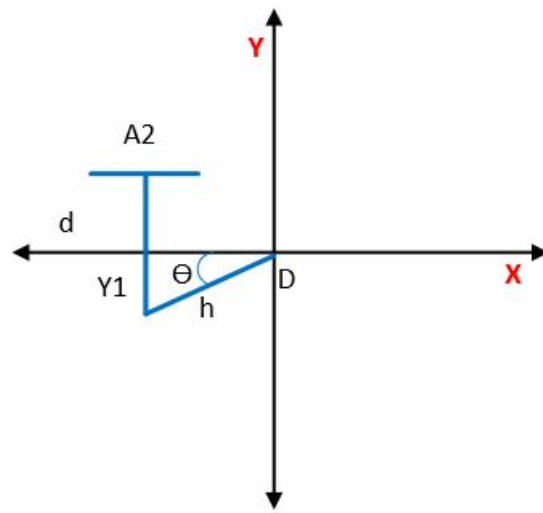


Figura 3.13: Cálculo de matriz DA_2

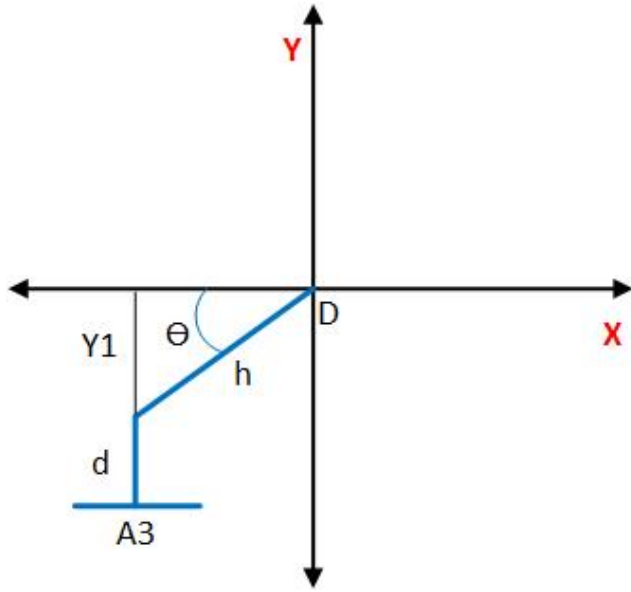


Figura 3.14: Cálculo de matriz DA_3

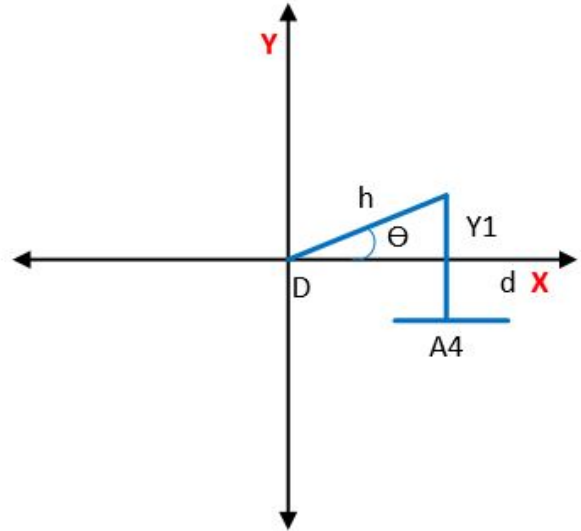


Figura 3.15: Cálculo de matriz DA_4

Como es de observar, para el cálculo de los vectores se usa una variable auxiliar Y_1 en todas las figuras, esto permite el despeje correcto de cada coordenada debido a la geometría en H de la góndola. Por lo tanto, el análisis de la góndola da como resultado los siguientes vectores:

$$DA_1 = \begin{bmatrix} h \cos \theta \\ h \sin \theta + d \\ 0 \end{bmatrix} \quad DA_2 = \begin{bmatrix} -h \cos \theta \\ -h \sin \theta + d \\ 0 \end{bmatrix} \quad DA_3 = \begin{bmatrix} -h \cos \theta \\ -h \sin \theta - d \\ 0 \end{bmatrix} \quad DA_4 = \begin{bmatrix} h \cos \theta \\ h \sin \theta - d \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3.2.6)$$

3.3. Modelo cinemático inverso

Como se mencionó en la sección 2.5.1.1 el problema cinemático inverso es conocer las configuración que debe tomar la estructura del robot para alcanzar una posición y orientación del extremo final. Para este caso de estudio, se debe obtener un modelo que permita obtener los ángulos que debe tomar cada antebrazo del robot H4 para llegar a un posición deseada de la góndola.

Según [3] y [14], el modelo cinemático inverso para un robot H4 se puede calcular expresando que la norma del vector $A_i B_i$ es constante y también igual a la longitud del brazo, esto se puede resumir con la siguiente ecuación:

$$\|A_i B_i\|^2 = L^2 \quad (3.3.1)$$

Calculado la norma para el vector se tiene que:

$$A_i B_i^2 = B_i A_i^2 = (P_i A_i - P_i B_i)^2 = P_i A_i^2 - 2 * P_i A_i \bullet P_i B_i + P_i B_i^2 = L^2 \quad (3.3.2)$$

Remplazando 3.2.3 en 3.3.2 y organizando:

$$-2l(P_i A_{i_x} \cos \alpha_i + P_i A_{i_y} \sin \alpha_i) \cos q_i + 2l P_i A_{i_z} \sin q_i = L^2 - l^2 - P_i A_i^2 \quad (3.3.3)$$

Como se observa la ecuación 3.3.3 depende del vector $P_i A_i$ que se define como:

$$P_i A_i = [OA_1 - OP_1 \quad OA_2 - OP_2 \quad OA_3 - OP_3 \quad OA_4 - OP_4] \quad (3.3.4)$$

La ecuación 3.3.3 puede ser reorganizada de la siguiente forma:

$$M_i \cos q_i + N_i \sin q_i = G_i \quad (3.3.5)$$

Donde los coeficientes M_i, N_i y G_i son iguales a:

$$\begin{aligned} M_i &= -2l(P_i A_{i_x} \cos \alpha_i + P_i A_{i_y} \sin \alpha_i) \\ N_i &= 2l P_i A_{i_z} \\ G_i &= L^2 - l^2 - P_i A_i^2 \end{aligned} \quad (3.3.6)$$

Debido a que los coeficientes dependen del vector $P_i A_i$ que dependen de las coordenadas X,Y,Z y θ , es posible calcular los ángulos estableciendo que:

$$t = \tan q_i/2 \quad (3.3.7)$$

$$2 \arctan t = q_i \quad (3.3.8)$$

Para calcular calcular t es necesario representar la ecuación 3.3.5 como una ecuación de segundo orden como se muestra a continuación:

$$a_i t^2 + b_i t + c_i = 0 \quad (3.3.9)$$

Donde:

$$a_i = G_i + M_i b_i = -2N_i c_i = G_i - M_i \quad (3.3.10)$$

Sustituyendo 3.3.9 en 3.3.8

$$q_i = 2 \arctan (-b_i \pm \sqrt{b_i^2 - 4a_i c_i})/2a_i \quad (3.3.11)$$

De la ecuación 3.3.11 se puede obtener la posición angular de los motores, siempre y cuando $a_i \neq 0$ y el término $b_i^2 - 4a_i c_i \geq 0$ evitando tener una solución en el rango de los complejos por ser una posición imposible de conseguir para la H.

3.4. Modelo cinemático directo

De acuerdo con [3] y [14], el modelo cinemático directo que representa al robot H4 da como resultado un polinomio de grado ocho representando principalmente un gran costo computacional, debido a esto se optó por usar una resolución interactiva de la forma 3.4.1 donde J es la matriz jacobiana, X_n el vector de coordenadas del órgano terminal y q_d es la posición articular al cual debe converger la ecuación. De este mismo modo, también se decide usar este método para el cálculo del modelo geométrico directo para el prototipo de robot H4 planteado en este trabajo.

$$X_{n+1} = X_n + J(X_n, q_n)[q_d - q_n] \quad (3.4.1)$$

3.5. Matriz jacobiana

La matriz jacobiana describe la relación de las velocidades articulares con las velocidades del extremo final del robot. De acuerdo con [3] y [14] la matriz jacobiana de un robot H4 se puede obtener mediante la relación de velocidades utilizada para robots paralelos descrita como:

$$J_x \dot{x} = J_q \dot{q} \quad (3.5.1)$$

Partiendo de una configuración en la que el robot no se encuentre en ninguna configuración singular, es posible calcular la matriz jacobiana de la siguiente manera:

$$J = J_x^{-1} * J_q \quad (3.5.2)$$

Donde J_x es la matriz asociada a la cinemática directa y J_q es la matriz asociada a la cinemática inversa del robot. Cada una de las matrices esta dada por las por las siguientes expresiones matemáticas:

$$J_x = [A_i B_i^T | (D A_j \times A_i B_i)_z] \quad (3.5.3)$$

$$J_q = \text{diag}((P_i B_i \times A_i B_i) \bullet U_{mi}) \quad (3.5.4)$$

Para llevar a cabo el cálculo de la matriz jacobiana es necesario calcular el vector $A_i B_i$ que representa el segmento entre la góndola o H del robot y el antebrazo. Dicho vector se obtiene restando el vector OB_i con el vector OA_i como se muestra a continuación:

$$A_i B_i = OB_i - OA_i \quad (3.5.5)$$

3.6. Estimación del volumen de trabajo

El espacio de trabajo se constituye por los puntos en el espacio que son alcanzables dentro del espacio cartesiano tridimensional por el elemento final de control del robot, en este caso, se entiende como los puntos a los que puede acceder el punto medio de la góndola del robot limitado por las restricciones físicas de las cadenas cinemáticas del mismo [12].

Tomando los diseños de algoritmos estudiados en [58], [59] y [12], se estudió el espacio de trabajo mediante un algoritmo desarrollado en el software Matlab que considera un cubo en el espacio tridimensional acotado en cada uno de sus ejes: $[-0.3, 0.3]$ para el eje X, $[-0.3, 0.3]$ para el eje Y y $[0, -0.6]$ para el eje Z. El cubo es recorrido mediante ciclos anidados iterativos a espacios uniformes de 0.01 mm, evaluando cada uno de los puntos mediante la aplicación del modelo cinemático inverso para determinar los ángulos alcanzables físicamente por el robot. Los resultados obtenidos se ven en las figuras 3.16, 3.17 y 3.18.

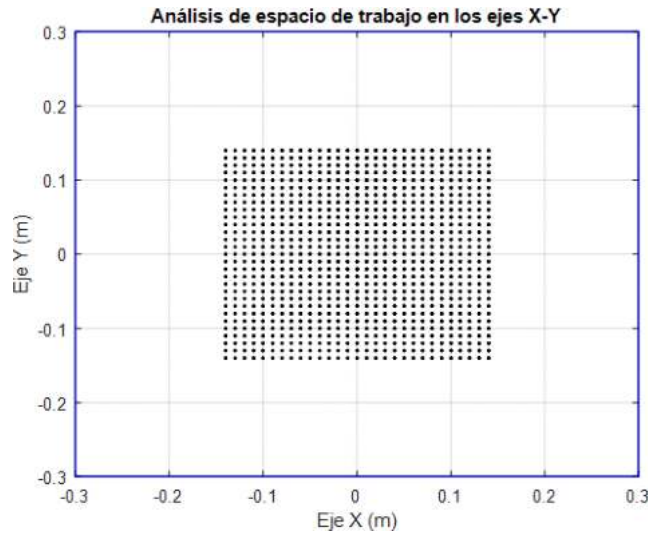


Figura 3.16: Espacio de trabajo para los planos X-Y.

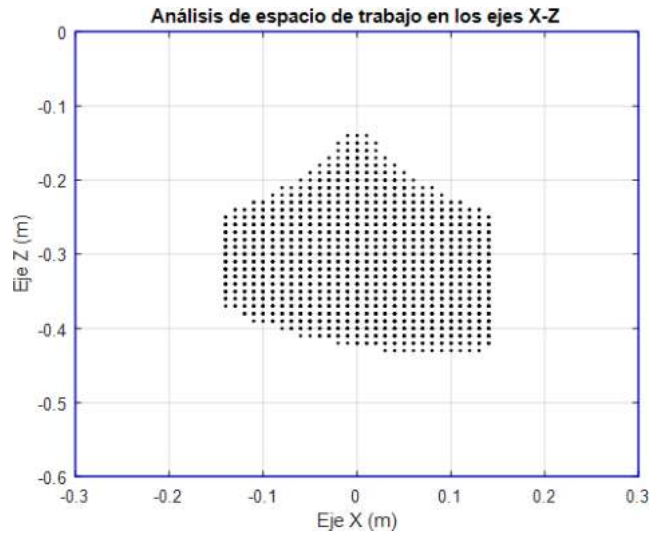


Figura 3.17: Espacio de trabajo para los planos X-Z.



Figura 3.18: Espacio de trabajo para los planos Y-Z.

De los anteriores resultados se observó que para el plano X-Y los puntos máximos alcanzables por el robot describen un cuadrado de 0.15m de lado. Para el plano X-Z se obtuvo una distribución de mayor alcance sobre el eje X para valores positivos y con una distribución menor en valores altos del eje Z. Por ultimo, en el plano Y-Z se evidenció que el alcance del espacio de trabajo aumenta en entorno a los valores positivos del eje X y disminuye para valores negativos. Con estos datos se construyó también el espacio de trabajo tridimensional el robot como se muestra en las figuras 3.19 y 3.20.

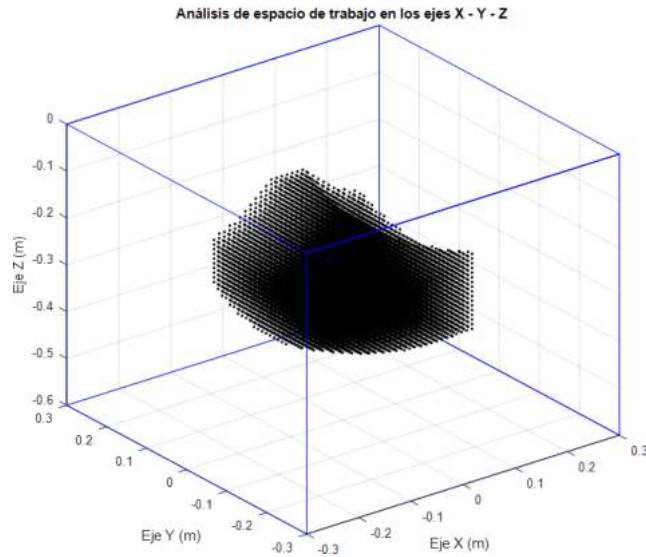


Figura 3.19: Espacio de trabajo para los planos X-Y-Z, vista 1.

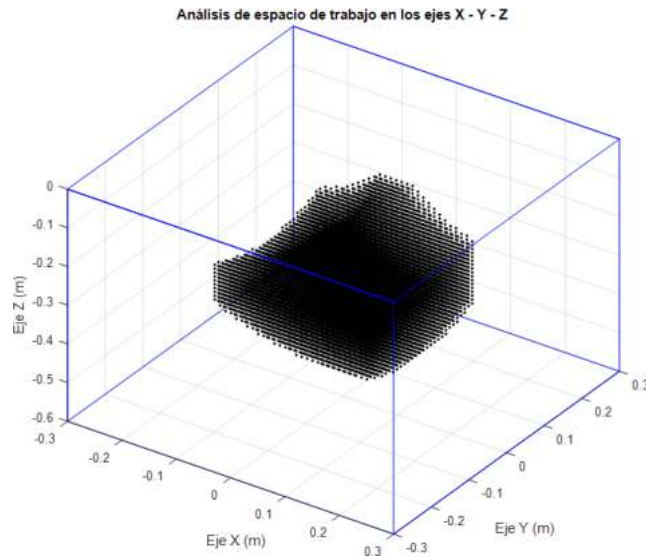


Figura 3.20: Espacio de trabajo para los planos X-Y-Z, vista 2.

3.7. Modelo dinámico de robot H4

Como se observó en la sección 2.5.2 cada uno de los elementos de la ecuación que representa el modelo dinámico de un robot está dado por funciones que pueden llegar a ser complejas, además cada uno de los elementos $M(q)$, $C(q, \dot{q})$ y $g(q)$ dependen de la geometría del robot [54]. Por ejemplo, en [60] el modelo dinámico que representa a un robot paralelo H4 esta dado por la ecuación 3.7.1, en esta ecuación $A(q)$ representa la matriz de inercia del robot y $H(q, \dot{q})$ representa los pares/fuerza de coriolis, la fuerza centrífuga y los pares gravitacionales.

$$\Gamma = A(q)\ddot{q} + H(q, \dot{q}) \quad (3.7.1)$$

Cada uno de sus términos $A(q)$ y $H(q, \dot{q})$ de la ecuación 3.7.1 está compuesto por:

$$A(q) = I_{mot} + J^T M_{bc} J + [J_1 J]^T M_{bl} [J_1 J] + [J_2 J]^T M_{bl} [J_2 J] \quad (3.7.2)$$

$$H(q, \dot{q}) = (J^T M_{bc} \dot{J} + [J_1 J]^T M_{bl} (J_1 \dot{J} + \dot{J}_1 J) + [J_2 J]^T M_{bl} (J_2 \dot{J} + \dot{J}_2 J)) \dot{q} - ([J_1 J]^T + [J_2 J]^T) M_{bl} G - J^T F_{ext} \quad (3.7.3)$$

Como se observa en las ecuaciones 3.7.2 y 3.7.3 que representan el modelo dinámico del robot paralelo H4, estas contienen elementos que caracterizan la geometría de este tipo de estructuras. I_{mot} representa las inercias de los motores sumado a la inercia de los antebrazos del robot, M_{bl} y M_{bc} las masa de la barra central y laterales respectivamente de la góndola en forma de H, J representa la matriz jacobiana del robot y los términos J_1 y J_2 representan en este caso la relación de velocidades dadas en los puntos de intersección $C1$ y $C2$ de las barras laterales con la barra central de la góndola como se muestra en la figura 3.21.

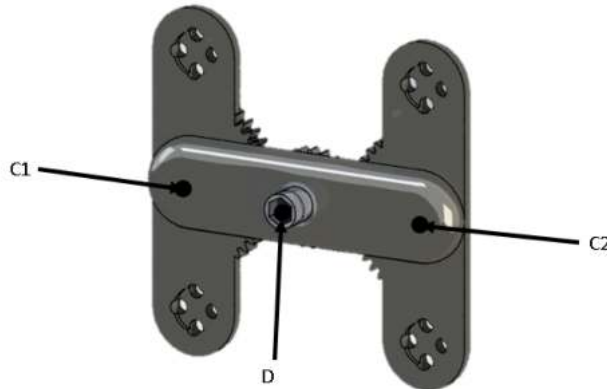


Figura 3.21: Góndola en forma de H [60]

En estudios como en [3], el modelo dinámico que representa al robot H4 viene dado por la misma ecuación 3.7.1, sin embargo, en este estudio se muestra un modelo dinámico mucho más simplificado, despreciando las fuerzas de fricción y donde el grado de libertad dado por la góndola en forma de H del robot siempre se mantiene en cero. Por lo tanto, los elementos $A(q)$ y $H(q, \dot{q})$ quedan representados de la siguiente manera:

$$A(q) = I_{mot} + J^T M J \quad (3.7.4)$$

$$H(q, \dot{q}) = J^T M \dot{J} \dot{q} - J^T M G \quad (3.7.5)$$

Como se observa en las ecuaciones 3.7.4 y 3.7.5, los elementos J_1 y J_2 no son tomados en cuenta debido a que el cuarto grado de libertad es omitido, también desprecian las fuerzas de fricción presentes en el robot. Este modelo simplificado permite disminuir el costo computacional disminuyendo la precisión del modelo dinámico del robot, sin embargo permite desarrollar el objetivo del control con algunas limitantes cuando se usan controles dinámicos.

3.8. Diseño de controladores

En esta sección se describe las dos estrategias de control implementadas en el prototipo de robot H4, la descripción se realiza a nivel conceptual a través de diagramas de bloques y la integración de las fórmulas de acción de control resultantes. Se divide en la descripción del control PID y control por torque calculado.

3.8.1. Control PID para robot H4

El control PID implementado para el prototipo de robot H4 describe el sistema robótico como un sistema lineal. Además, cada brazo esta controlado por un control PID descentralizado con ganancias constantes para cada brazo, siguiendo el mismo esquema descrito en el apartado 2.6.1.2.

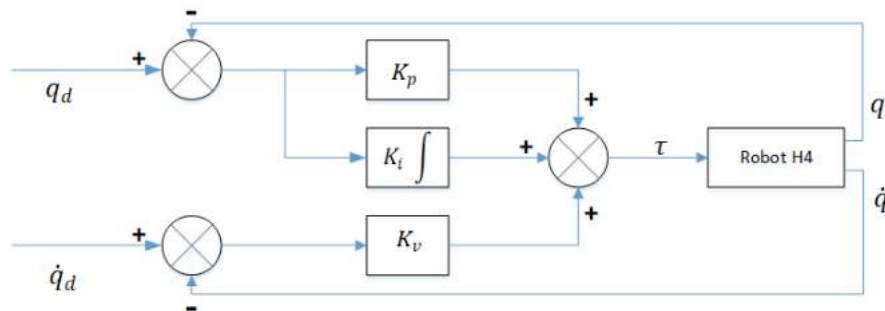


Figura 3.22: Control PID robot H4

La figura 3.22 representa el diagrama en bloques del control PID usado, donde las entradas q_d y \dot{q}_d representan las posiciones y velocidades articulares deseadas, q y \dot{q} las posiciones y velocidades proporcionadas por el robot; k_p , k_i y k_v son las ganancias correspondientes a la parte proporcional, integral y derivativa respectivamente del control PID; y τ corresponde al esfuerzo de control entregado por el PID hacia el robot.

En la figura 3.23 se presenta el modelo de control implementado a través de Simulink, exponiendo los distintos bloques y subsistemas que lo componen; se adapta los conceptos del

diagrama presentado en la imagen anterior a las necesidades de la implementación particular.

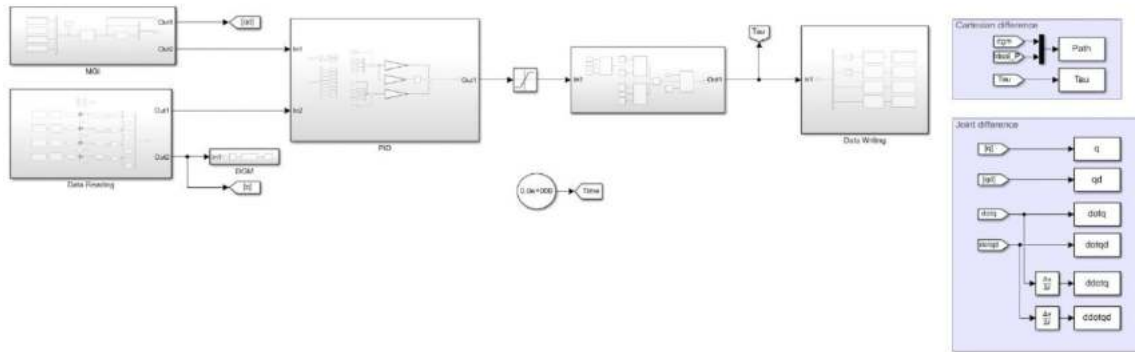


Figura 3.23: Esquema general del control PID implementado

La figura 3.24 presenta de manera detallada el proceso de lectura y adquisición de datos provenientes de los sensores del robot, se pueden observar siguiendo los flujos de datos: bloque de lectura de datos, donde se recibe la información cruda de los sensores; de desempaquetado de datos, donde se transforman los datos en valores de lectura; de conversión de formato, donde los valores se convierten de formato int32 a double; ganancias de conversión, donde el valor de lectura se adapta a la escala usada; ajuste de lectura de sensor, donde se compensan las diferencias de comportamiento de los sensores; filtro de señal, donde a través de función de transferencia se reduce el nivel de ruido de las lecturas; selector de señal, donde se permite el paso de la señal sin filtrar durante 0.5s para permitir que el filtro alcance el valor de seguimiento y derivación de la señal, donde se calcula mediante software los valores de velocidad de la articulación para cada brazo.

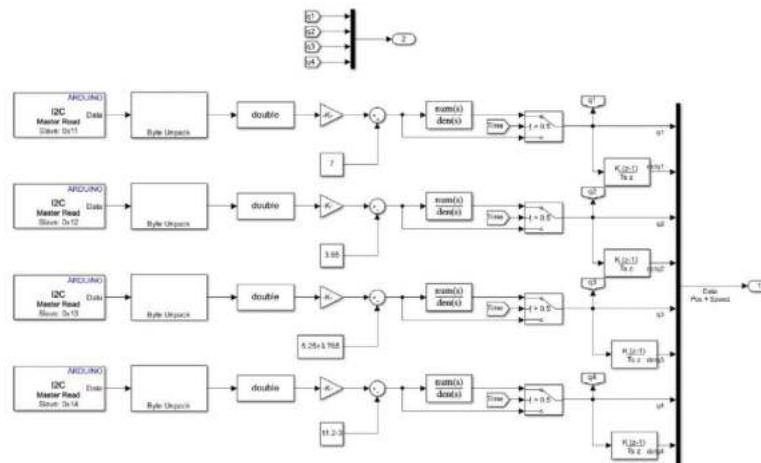


Figura 3.24: Esquema general del control PID implementado: Data read

La figura 3.25 muestra el bloque de conversión de trayectoria deseada, donde se transforma la consigna en términos cartesianos a términos de posición y velocidad articular para ser procesados por el bloque de control.

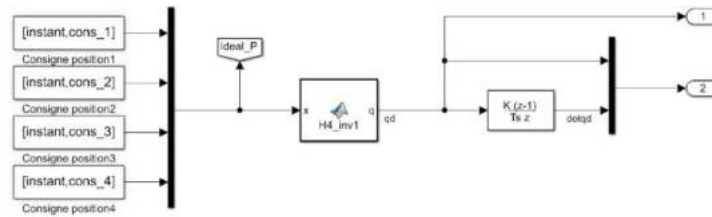


Figura 3.25: Esquema general del control PID implementado: MGI

En la figura 3.26 se presenta el bloque de control PID, con sus entradas de datos y ganancias para cada cadena cinemática.

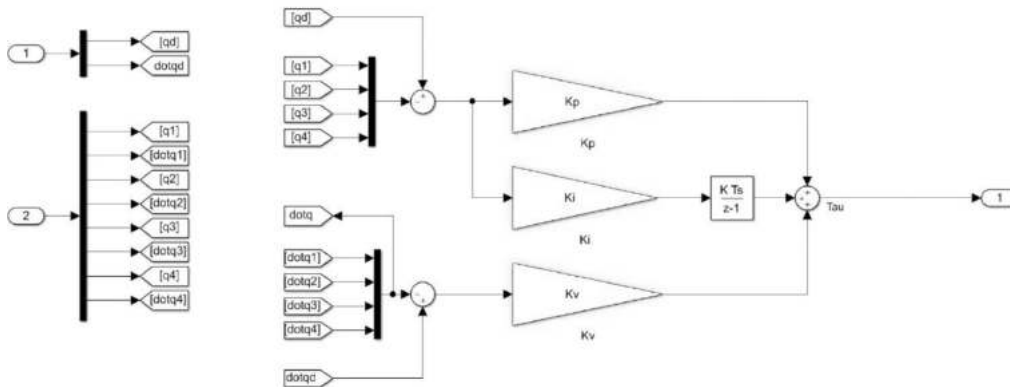


Figura 3.26: Esquema general del control PID implementado: PID

En la figura 3.27 se retrata el proceso de protección desarrollado para el robot donde existen dos condiciones que llevan a la detención por medio de software del prototipo: En caso de que el ángulo de cualquiera de los antebrazos sea mayor a 105 grados, punto en el cual comienza a verse comprometida la integridad del sistema o cuando el tiempo de simulación de consigna sea mayor a 14.9s, instante en el que la trayectoria culmina y da paso a la finalización de la ejecución.

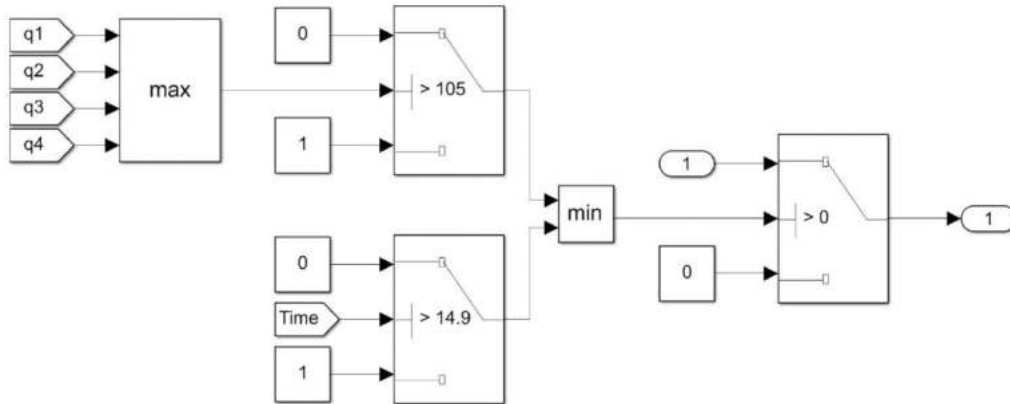


Figura 3.27: Esquema general del control PID implementado: Protection

Finalmente, la figura 3.28 Presenta el proceso de escritura de datos con el esfuerzo de control. Se tienen de izquierda a derecha: Bloque demux, donde la señal de control se separa en señales individuales para cada brazo; bloques de empaquetado, que transforman el valor del esfuerzo de control en tramas comunicables a través del protocolo y bloques de escritura a los arduino esclavos.

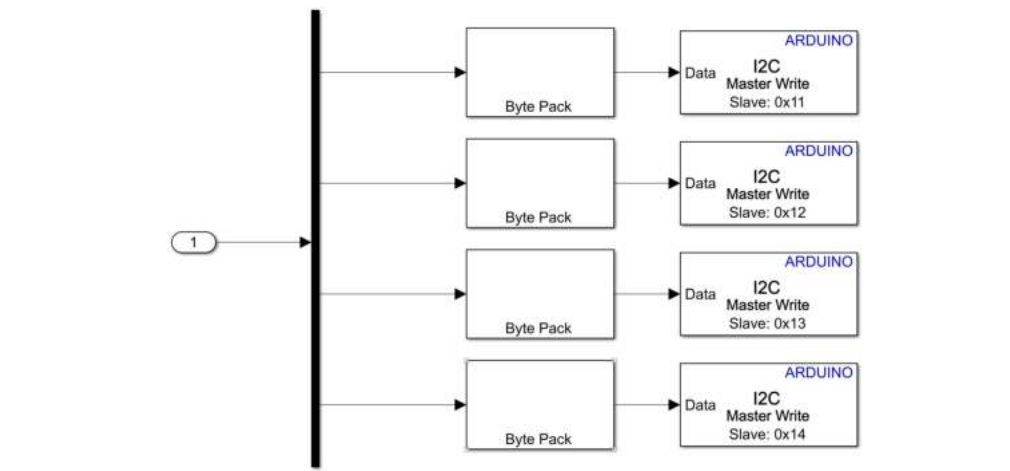


Figura 3.28: Esquema general del control PID implementado: Data writing

3.8.2. Control CTC para robot H4

Como se observó en la sección 2.6.2 el control par calculado es un controlador no lineal en las variables de estados (posiciones y velocidades articulares) que permite describir el sistema de control en lazo cerrado mediante una ecuación diferencial lineal de forma global. Además, está basado en el modelo dinámico del manipulador por lo tanto hace uso de la matriz de inercia, la matriz de pares gravitacionales y la matriz centrífuga y de coriolis.

El control CTC usado para el robot H4 es descrito en [3], emplea las estimaciones de las matrices $A(q)$ y $H(q, \dot{q})$ previamente descritas en la sección 3.7, las trayectorias de los movimientos articulares deseados q_d , \dot{q}_d y \ddot{q}_d , así como la medición de la posición q y la velocidad \dot{q} para realizar el cálculo de la acción de control. El diagrama que describe el controlador se muestra en la figura 3.29.

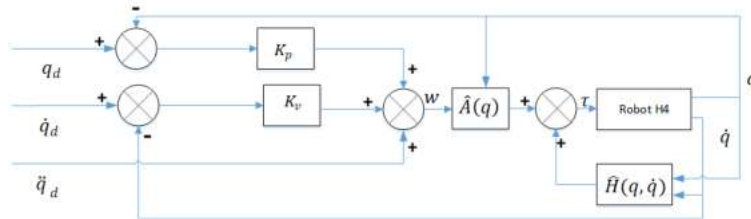


Figura 3.29: Control CTC robot H4

La acción de control τ esta dada por:

$$\tau = \hat{A}(q)w(t) + \hat{H}(q, \dot{q}) \quad (3.8.1)$$

Donde $w(t)$ se puede considerar como un nuevo vector de control y por lo tanto se reduce a un problema de control de n sistemas de segundo orden lineales, invariantes y desacoplados. Por lo tanto, la relación que denota a $w(t)$ esta dada por la ecuación 3.8.2 siempre y cuando el movimiento deseado esté totalmente definido.

$$w(t) = \ddot{q}_d + k_v(\dot{q}_d - \dot{q}) + k_p(q_d - q) \quad (3.8.2)$$

De forma homóloga al caso del control PID, en la imagen 3.30 se muestra en diagrama general implementado para el controlador CTC en la herramienta Simulink. el diagrama posee bloques comunes como los subsistemas de lectura de datos, escritura de datos y protección, por lo que a continuación se describen solamente los bloques particulares del control CTC.

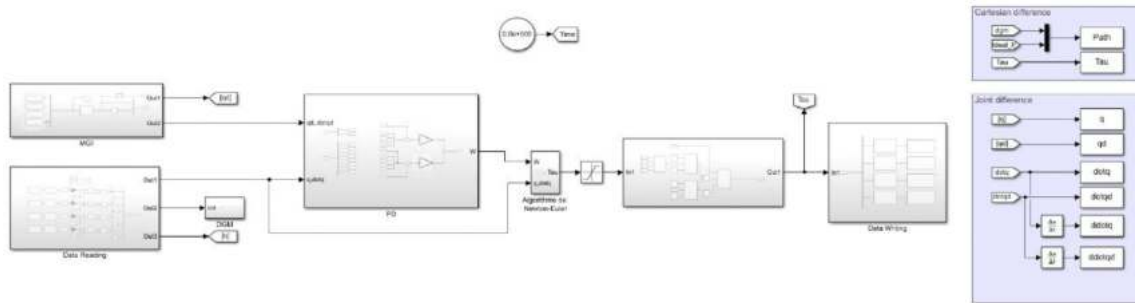


Figura 3.30: Esquema general del control CTC implementado

La figura 3.31 contiene el esquema de control específico de esta estrategia con sus respectivas ganancias para valores proporcionales y derivativos.

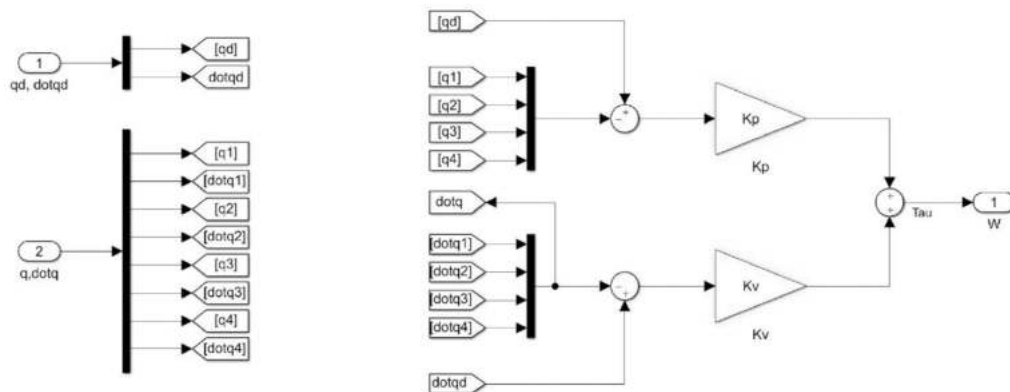


Figura 3.31: Esquema general del control CTC implementado

Por último, la figura 3.32 presenta los bloques necesarios para la implementación del algoritmo Newton-Euler para la culminación de la estrategia de control CTC.

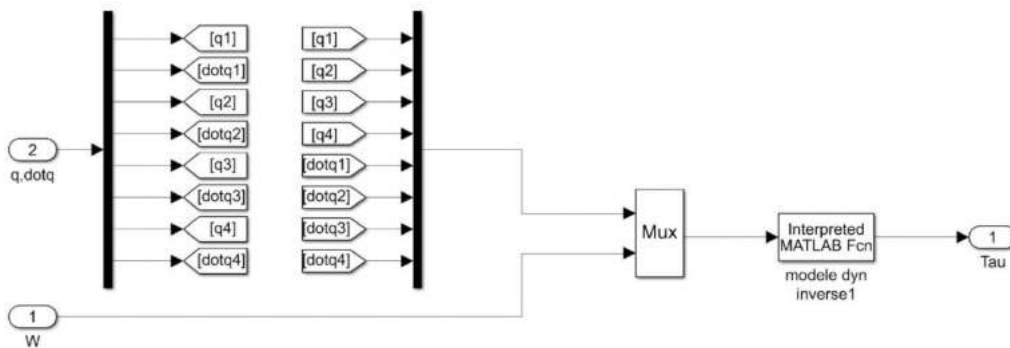


Figura 3.32: Esquema general del control CTC implementado

CAPÍTULO 4

DESARROLLO E IMPLEMENTACIÓN DEL PROTOTIPO

Contenido del capítulo

4.1. Elementos estructurales y mecánicos	65
4.2. Elementos de medición y accionamiento	77
4.3. Elementos de control	79
4.4. Elementos de sistema de potencia	81
4.5. Protocolos de comunicación	83
4.6. Conexión eléctrica de componentes	87
4.7. Implementación del prototipo	91

En este capítulo, se describe el proceso de desarrollo e implementación del prototipo planteado, con los componentes necesarios para el correcto funcionamiento del prototipo tanto a nivel físico como a nivel lógico. También se detallan los componentes usados en el sistema de control y en el sistema de potencia así como sus respectivos diagramas de conexión. El capítulo concluye con la presentación del prototipo implementado, calibrado y listo para la realización de las pruebas pertinentes.

4.1. Elementos estructurales y mecánicos

En esta sección se abordan los elementos y mecanismos que establecen la geometría y las características dinámicas del robot paralelo estudiadas en capítulos anteriores; su disposición, configuración y generalidades de su fabricación o adquisición.

4.1.1. Caracterización de la estructura

Para la sujeción del robot se evaluaron distintas opciones de estructura de soporte, decidiendo al final por una estructura en madera de fácil transporte e instalación en variedad de ambientes, a causa del uso académico del robot y su búsqueda de adaptabilidad a múltiples ambientes con la mayor flexibilidad.

Dicha estructura constituye una forma de C donde en la parte superior de la misma se fijan los soportes de las cadenas cinemáticas y en la parte inferior se apoya sobre cualquier superficie sólida nivelada.



Figura 4.1: Estructura de soporte del robot.
(Vista Frontal)



Figura 4.2: Estructura de soporte del robot.
(Vista Lateral)



Figura 4.3: Estructura de soporte del robot. (Vista isométrica)

4.1.2. Elementos de las cadenas cinemáticas

Esta subsección lista y describe de forma descendente, los elementos necesarios para la composición a nivel mecánico de la estructura del robot H4 incluyendo los elementos pasivos implicados activamente en el funcionamiento del robot. Cabe señalar que debido a las geometrías y comportamientos requeridos, así como por sus características físicas y mecánicas en conjunto a la practicidad de prototipado, se hizo uso de fabricación aditiva por deposición de plástico fundido (FDM) [61] para la fabricación de los soportes del motor, los soportes de los antebrazos, los antebrazos, los anclajes de tensores y las uniones T. El alma del antebrazo se construyó mediante mecanizado en torno y los demás componentes se tratan de adquisiciones comerciales. Los planos de cada una de las piezas, listados de componentes, ajustes de impresión utilizados y demás, se describen en el Anexo A.

4.1.2.1. Soporte del motor

Este elemento se desarrolló para garantizar la sujeción estable del motor a la base rígida, se trata de una pieza inspirada en los soportes tradicionales en L para motor, capaz de ofrecer la rigidez mecánica y estructural necesaria para soportar de forma fiable los actuadores con las fuerzas y torques que estos generan, al tiempo que garantiza la distancia necesaria del eje hacia la base rígida y hacia las demás piezas para una libre rotación sobre el eje del motor.

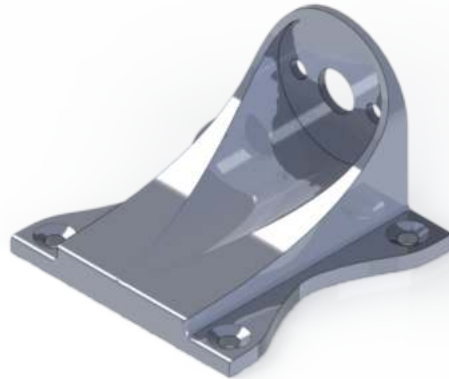


Figura 4.4: Soporte del motor en modelo 3D renderizado

4.1.2.2. Soporte del antebrazo

Diseñado para soportar las fuerzas presentes en el brazo y dirigir las hacia la base fija; determina el punto sobre el que rotan los antebrazos y permite la colocación del potenciómetro sobre su eje. Fue diseñado desde cero para satisfacer los requisitos funcionales planteados. Cuenta con una cuna primaria de cara al antebrazo que aloja un rodamiento para facilitar la rotación de la cadena y una cuna secundaria al reverso para posicionar el potenciómetro, alineando el punto medio del rango del potenciómetro con el punto de referencia de posición del sistema.

Se debe señalar que debido a esta última característica, los modelos del soporte varían ligeramente de una cadena cinemática a otra, como consecuencia, en esta sección se muestra uno de ellos como referencia. La descripción detallada se muestra en el anexo A.

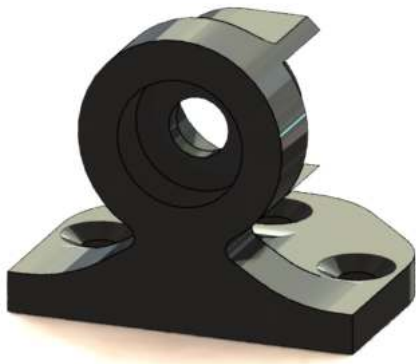


Figura 4.5: Soporte del antebrazo en modelo 3D renderizado - Vista A

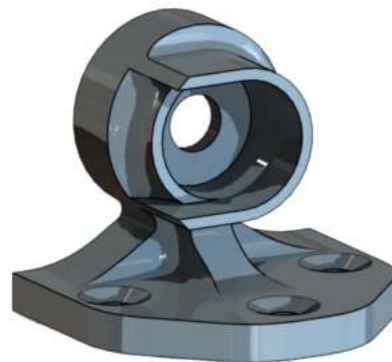


Figura 4.6: Soporte del antebrazo en modelo 3D renderizado - Vista b

4.1.2.3. Alma del antebrazo

Se constituye como la pieza encargada de garantizar la rotación concéntrica y la transmisión del movimiento del actuador rotacional al robot. Por su alta demanda de características tanto físicas como mecánicas se construyó a partir de bronce sólido en el que se mecanizó la geometría deseada incluyendo: Agujero para la introducción del eje del motor, cuñero para su fijación, agujero para el tornillo prisionero que fija la cuña, torneado para ajuste con el soporte del antebrazo y muesca plana para acople con el potenciómetro.



Figura 4.7: Alma del antebrazo modelado en 3D renderizado

4.1.2.4. Antebrazo

Constituye la primera pieza móvil pasiva de las cadenas cinemáticas, recibiendo el par y movimiento del motor a través del alma del antebrazo para transferirlo al resto del sistema. La pieza se diseña como una barra mayormente rectangular con cavidades en el extremo superior para alojar el alma del antebrazo y una tuerca de sujeción para introducir un tornillo prisionero. En el extremo inferior se modeló una perforación para el eje pasante, un chafán que evita la colisión con los brazos con el antebrazo y cunas a cada lado para recibir adecuadamente la presión originada por los brazos en el eje pasante. esta manera se obtuvo una alta tasa de integración, característica fundamental a operar en un prototipo de proporciones reducidas.

El diseño resulta en una pieza mecánica estructural de 25cm de largo con una alta tasa de

integración al contar con capacidad de rotar libremente, acoplar los sensores y los actuadores y permitir el desplazamiento de los brazos a través del eje sin presentar colisiones o interferencias con otras piezas. El resultado del proceso de diseño se muestra en la figura 4.8.



Figura 4.8: Antebrazo modelado en 3D renderizado

4.1.2.5. Brazos

Para la construcción de los brazos del robot H4 se usó varillas huecas de aluminio en disposición paralela. Presentan una sujeción mediante rosca en los extremos para las juntas esféricas y se encargan de transmitir el movimiento desde los antebrazos del robot hacia las juntas T que a su vez transmiten el movimiento a la góndola y al órgano terminal del robot.



Figura 4.9: Brazos de robot H4

4.1.2.6. Acoples para tensores

Se tratan de piezas diseñadas a medida inspiradas en abrazaderas que permiten soportar la tensión de dos resortes separados por las barras en paralelo de los brazos permitiendo

eliminar movimientos no deseados y con esto, mantener el carácter paralelo de los brazos en todo momento. Para la sujeción de los tensores, los acoples cuentan con dos protuberancias cercanas al anillo principal y dos ranuras a modo de guía.



Figura 4.10: Acoples para tensores

4.1.2.7. Uniones esféricas

Para las uniones esféricas presentes en el diseño del robot H4, se decidió usar dieciséis juntas de rotula SI4T/K de rodamientos esféricos fabricados en acero inoxidable para permitir los movimientos de los ejes superior e inferior de los brazos. Además, su diseño en acero inoxidable garantiza una gran durabilidad permitiendo un correcto funcionamiento a través del tiempo. Este elemento se muestra en la figura 4.11.



Figura 4.11: Juntas de rotula

4.1.2.8. Uniones T

Para el punto de unión entre los brazos y la góndola del robot, se usó uniones en T diseñadas en 3D para alojar en su interior los ejes pasantes del extremo final de los brazos y los tornillos de sujeción hacia la H del sistema. Esta pieza se puede ver en la figura 4.12.

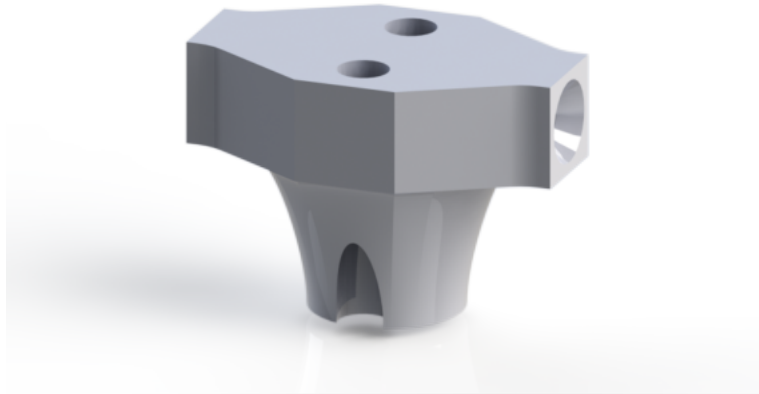


Figura 4.12: Juntas de T

4.1.2.9. Góndola

Para el diseño de la H se desarrollaron 4 piezas: Una barra central, dos barras externas y un órgano terminal. De forma conjunta constituyen la geometría en forma de H descrita en la sección 3.2.

Las barras externas cuentan con guías en los extremos para acoplar las uniones T en disposiciones de 0, 90, 180 o 270 grados y un piñón que transmite movimiento a través del órgano terminal a la segunda barra para mantener su relación paralela.

La barra central aloja el órgano terminal y conecta las dos barras externas.

El órgano terminal se configura en la ubicación de el efector del robot, cuenta con capacidad de alojar diferentes elementos a través de un agujero, para el caso de esta investigación se usará para acoplar las masas necesarias en las pruebas de robustez.



Figura 4.13: Góndola del robot vista frontal



Figura 4.14: Góndola del robot vista posterior

4.1.2.10. Vista general del diseño del robot

Este apartado vistas renderizadas y detalles del diseño conceptual del prototipo del robot H4 desarrollado con la herramienta de software CAD SolidWorks [62], explicando su estructura y las relaciones entre los componentes con el propósito de brindar una perspectiva general de las partes que a nivel físico componen el sistema.

A través de una vista isométrica (figura 4.15) y su complemento observado desde la parte inferior del robot (figura 4.16) se puede identificar las distintas secciones mayores del robot. De arriba hacia abajo se tiene la base rígida del robot y las cuatro cadenas cinemáticas compuestas por los antebrazos, los brazos, y la góndola o H del robot en la parte inferior.



Figura 4.15: Robot H4 propuesto, vista isométrica.

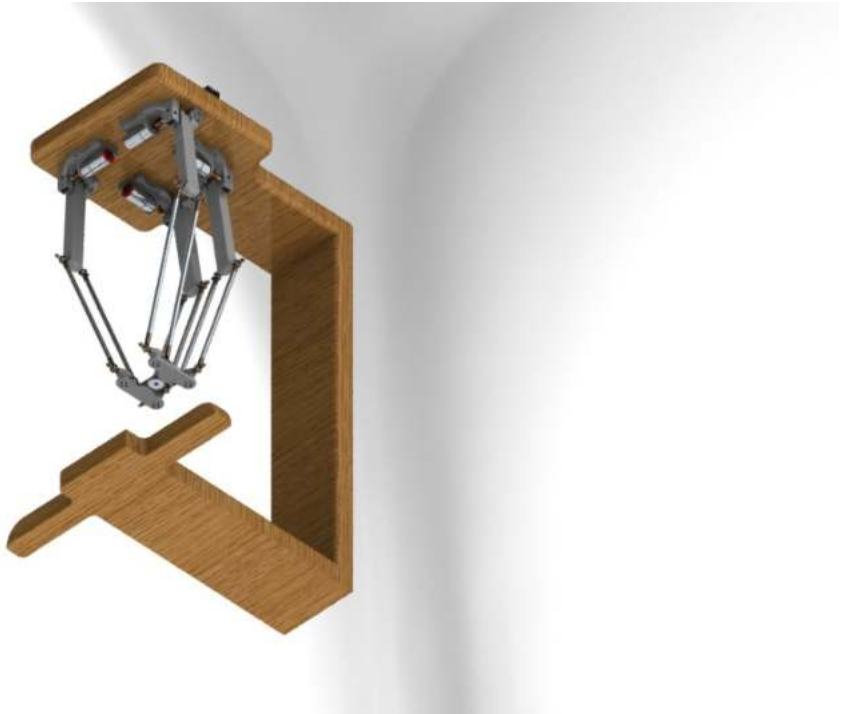


Figura 4.16: Robot H4 propuesto, perspectiva inferior.

Para brindar un mayor nivel de detalle de la sección superior, en la base rígida, al inicio de las cadenas cinemáticas se encuentran ubicados los soportes de los motores y de los antebrazos para cada extremidad. Sus ubicaciones así como su configuración a 0° , 180° , 270° y 270° se pueden observar en las figuras 4.17 y 4.18 de acuerdo a lo especificado en la sección 3.2.



Figura 4.17: Robot H4 propuesto, vista isométrica con transparencia en base rígida.



Figura 4.18: Robot H4 propuesto, sección superior.

Las cadenas cinemáticas inician su movimiento en el alma del antebrazo que va unido al eje de los motores. A partir de aquí y continuando hacia abajo, encontramos la unión de los antebrazos con los brazos a través de ejes pasantes.

Sobre los brazos encontramos los resortes acoplados a través de sus soportes como se observa en las figuras 4.19, 4.20 y 4.21. Posteriormente un segundo eje pasante conecta los brazos con las uniones T que a su vez se unen a la góndola del robot.



Figura 4.19: Robot H4 propuesto, vista frontal.



Figura 4.20: Robot H4 propuesto, vista lateral.



Figura 4.21: Robot H4 propuesto, vista trasera.

En el extremo inferior de las cadenas cinemáticas se encuentra la góndola o H del robot, asegurando que los ángulos de las uniones T correspondan a 0, 180, 270 y 270 grados respectivamente. En la figura 4.22 se muestra el detalle de la góndola y su unión a las cadenas cinemáticas del robot.



Figura 4.22: Robot H4 propuesto, vista inferior.

4.2. Elementos de medición y accionamiento

Presenta los componentes elegidos para desempeñar acciones de medición de variables y ejecución de los esfuerzos de control, incluyendo las características y/o adaptaciones realizadas para la implementación en el robot.

4.2.1. Sensores

Para obtener una medición confiable de la posición angular, se decidió usar un potenciómetro rotatorio con un rango aproximado de 250° (ver figura 4.23) con el objetivo de conocer la posición absoluta del eje del motor sin pérdida de referencia al momento de cortar la alimentación del sistema. Estos potenciómetros se adaptaron debido a las dimensiones reducidas del robot, reduciendo el largo de la caña de medición y reconstruyendo el canal para sujetarse a las almas de los antebrazos de forma confiable. Para el caso del control CTC donde se hace necesario determinar la velocidad angular de cada una de las cadenas cinemáticas, se hace uso de cálculo derivativo a través de software.



Figura 4.23: Potenciómetro

4.2.2. Actuadores

El diseño del robot H4 trabajado requiere cuatro actuadores que presenten un movimiento rotacional. Para esto se decidió implementar los motor-reductores de corriente continua mostrados en la figura 4.24. Cuentan con un juego de engranaje que permite disminuir la velocidad y al mismo tiempo incrementar el par proporcionado por el motor.



Figura 4.24: Motor-reductor CHR GM25 370

Características

Voltaje nominal: $6,0VDC$

Velocidad sin carga: $210RPM$ a $0,13A$

Relación de engranaje: $1 : 34$

Carga de pérdida: $10kg * cm$

Corriente de pérdida: $3,6A$

Posterior a la caja de engranajes original del motor, debido a necesidad de suministrar más torque para mover satisfactoriamente la estructura completa del robot se hizo necesaria la inclusión de un juego de Tornillo sin fin - Corona que se puede ver en la figura 4.25, cuenta con una reducción de 14:1, permitiendo un gran incremento en el par motor de los actuadores a cambio de la inclusión de empuje axial en el sistema que ofrece resistencia a cambios de sentido del motor.



Figura 4.25: Tornillo sin fin - Corona

4.3. Elementos de control

El sistema de control está compuesto por los componentes hardware encargados de procesar la información necesaria para alimentar los lazos de control y ejecutar las acciones determinadas. Se divide la sección en el dispositivo maestro y los dispositivos esclavos.

4.3.1. Tarjeta electrónica de control maestro

Se trabaja bajo la referencia Arduino uno [63] (ver figura 4.26), se distingue por ser un microcontrolador bastante usado en ámbitos de estudio e investigación, cuenta con suficientes pines de E/S, convertidor analógico digital y la posibilidad de establecer diferentes protocolos de comunicación, además por tener una comunidad muy activa se tiene disponible una gran variedad de complementos electrónicos y librerías de programación que permite el desarrollo de proyectos con mayor facilidad [63].



Figura 4.26: Arduino UNO [63]

En la implementación del prototipo se encarga de coordinar los flujos de información desde la recepción de lecturas de sensores hasta la entrega de esfuerzos de control.

Características generales:

- Microcontrolador: ATmega328

- Memoria flash: 32 Kb
- memoria SRAM 2 KB
- Pines para E/S digital: 22 (6 pueden usarse como salida de PWM)
- Pines de entrada analógica: 8
- Corriente continua por pin IO: 40mA
- Voltaje de operación: 5V DC
- velocidad del reloj: 16 MHz

4.3.2. Tarjeta electrónica de control esclavo

La tarjeta de control esclavo es utilizada para recibir las señales de los sensores y enviarlas hacia el Microcontrolador maestro, lo cual permite adquirir información de manera paralela los sensores utilizados para el control de los brazos del robot. Con este fin, se ha decidido usar cuatro microcontroladores Arduino Nano [63], los cuales presentan un tamaño y costo inferior que el del arduino Uno pero manteniendo las características necesarias para completar los lazos de control en el sistema, cumpliendo sin inconvenientes las labores designadas de recepción y transmisión de información.

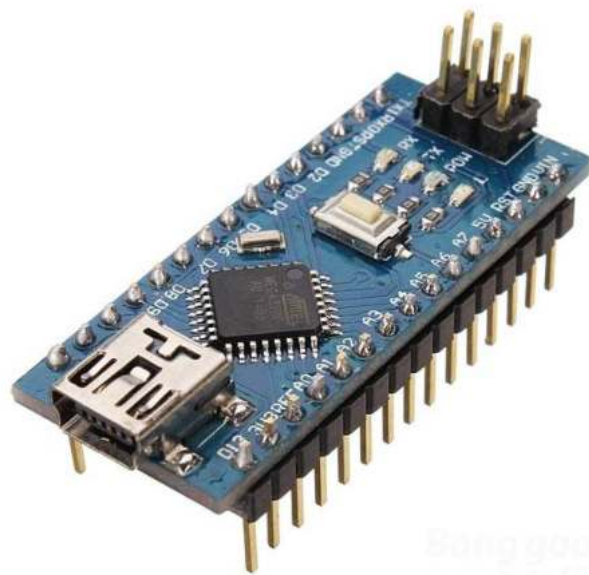


Figura 4.27: Arduino Nano [63]

Características generales:

- Microcontrolador: ATmega328

- Memoria flash: 32 Kb
- memoria SRAM 2 KB
- Pines para E/S digital: 14 (6 pueden usarse como salida de PWM)
- Pines de entrada analógica: 6
- Corriente continua por pin IO
- Voltaje de operación: 5V DC
- velocidad del reloj: 16 MHz

4.4. Elementos de sistema de potencia

En esta sección se describe los elementos encargados de la alimentación y distribución de potencia a todos los elementos del sistema electrónico del robot, permitiendo el suministro necesario para la correcta operación de todos los componentes electrónicos del prototipo

4.4.1. Módulos de control de motores

El sistema de potencia es crucial para alimentar los motores debido a su mayor demanda energética y características propias de cargas inductivas, resultando necesario el uso de dos módulos puente H con referencia L298N para realizar el control de potencia y sentido de giro de los actuadores por medio de pulsos PWM (*Pulse Width Modulation*).

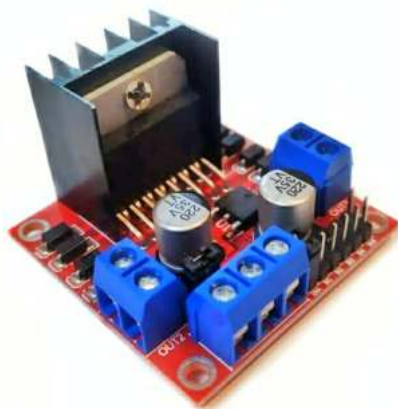


Figura 4.28: Modulo puente H L298N

Características generales:

- Canales: 2 (soporta 2 motores DC o 1 motor paso a paso)

- Voltaje de control: 5V
- Voltaje de potencia (V motor): 5V - 35V DC
- Consumo de corriente (lógico): 0 a 36mA
- Capacidad de corriente: 2A (picos de hasta 3A)
- Potencia máxima: 25W

4.4.2. Fuente de alimentación

Para la alimentación eléctrica del sistema se usó una fuente de alimentación regulada ATX que brinda una potencia de 168W en su salida de 12V, potencia requerida debido al consumo energético estimado de hasta 110W por parte de los actuadores en conjunto al sistema electrónico de control.



Figura 4.29: Fuente de alimentación.

4.4.3. Módulo regulador de voltaje

Se trata de un módulo reductor de voltaje basado en el integrado LM317, con un voltaje de entrada máximo de 40V y un voltaje de salida variable entre 1.7V y 37V a 1,5A, encargado de regular la tensión de entrada a 7V para la alimentación de los microcontroladores esclavos.

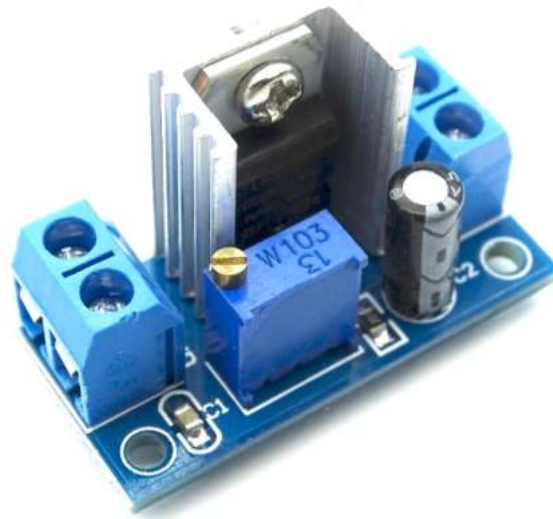


Figura 4.30: Modulo regulador LM317.

Características generales:

- Voltaje de entrada de 4 a 40 V
- Voltaje de salida de 1.5 a 35 V
- Salida de Voltaje ajustable con potenciómetro (10 vueltas)
- Disipador incluido adherido al LM317
- Corriente máxima de 1.5 amperes

4.5. Protocolos de comunicación

Los protocolos son necesarios para comunicar los distintos elementos electrónicos del sistema, permiten mantener un flujo de información desde los sensores hasta el sistema de control y desde sistema de control a los actuadores. Para establecer esta comunicación entre los distintos componentes del sistema de control se ha decidió utilizar dos protocolos de comunicación denominados I2C y USART.

4.5.1. Protocolo de comunicación USART

Se caracteriza por ser una comunicación serie asíncrona donde la señal de reloj usada por el controlador o microcontrolador no se intercambia entre el emisor y el receptor, permitiendo

iniciar la comunicación en cualquier instante. Debido a la a asincronía de esta comunicación se debe establecer una tasa de transmisión de datos “*Baud rate*” entre el emisor y el receptor **diaz2015uart**.

Como se muestra en la figura 4.31, el protocolo USART se compone de dos líneas: TX (línea de transmisión de datos), RX (Línea de recepción de datos) usados de manera cruzada para enviar los datos entre los dispositivos.

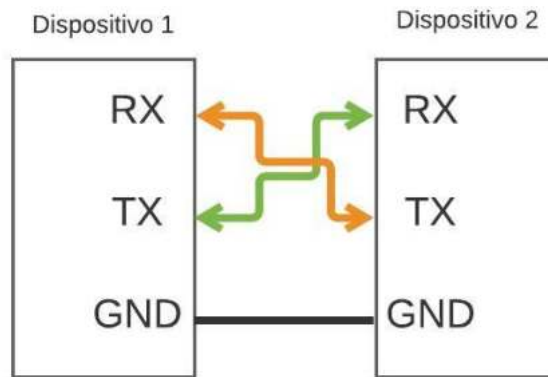


Figura 4.31: Esquema protocolo USART.

La secuencia de transmisión de datos para un carácter usando el protocolo USART en un dispositivo que cuenta con hardware UART es presentado en la siguiente figura:

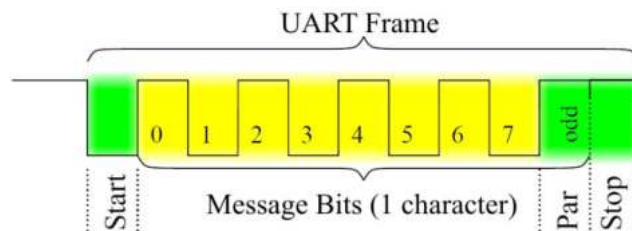


Figura 4.32: Secuencia de envío de un carácter. [64]

Este protocolo es usado para comunicar el microcontrolador Arduino uno maestro con la computadora que contiene el algoritmo de control como se observa en el esquema 4.33, la comunicación se realiza de forma automática al utilizar el paquete para Arduino suministrado por MathWorks [65]. El algoritmo usado en Arduino para establecer la comunicación Simulink-Arduino se genera también de forma automática en las configuraciones del paquete.

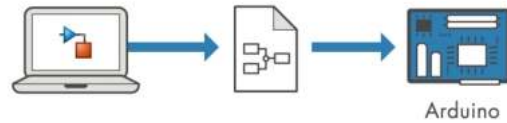


Figura 4.33: Comunicación simulink-arduino [65]

4.5.2. Protocolo de comunicación I2C

Es un bus en serie síncrono de comunicación de datos diseñado por Philips en 1992, permite velocidades entre 100 kbit/s y 3.4Mbits, es comúnmente utilizado en la comunicación de microcontroladores y periféricos en sistemas integrados, especialmente en industrias. El protocolo I2C se caracteriza por establecer dos tipos de dispositivos: Maestros y esclavos, cada uno con una dirección única; La configuración maestro-esclavo permite tener varios dispositivos conectados recibiendo o enviando información desde o hacia el dispositivo maestro que inicializó la comunicación. El esquema para este protocolo se muestra en la figura 4.34 [66] **diaz2015uart**.

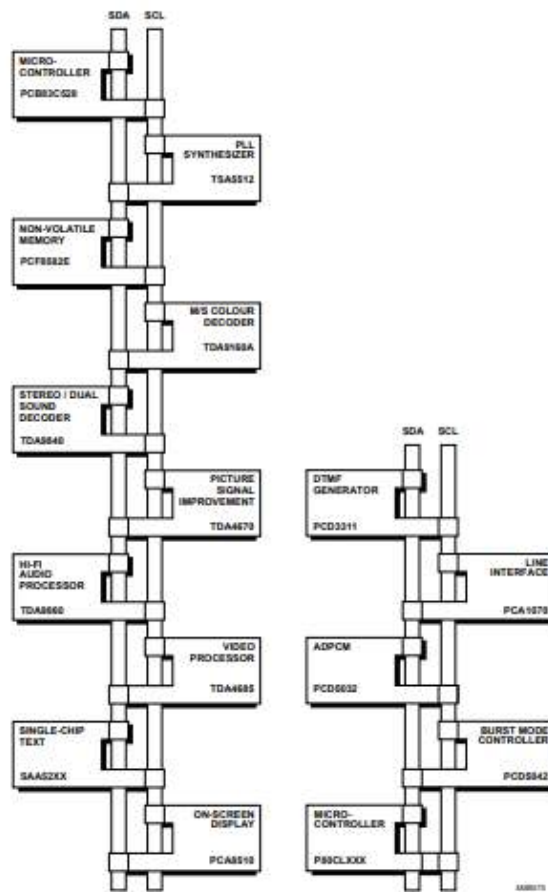


Figura 4.34: Comunicación bus i2c entre dispositivos. [66]

Para la comunicación de los datos mediante este bus, es necesario dos líneas de señal SDA Y SCL que se caracterizan por ser bi-direccionales y estar conectadas a una fuente que suministra energía a resistores pull-up como se muestra en la figura 4.35. La línea SDA (*serial data*) es la encargada de transmitir la información entre los dispositivos esclavo y maestro, y la línea SCL (*serial clock*) es aquella que permite la sincronización de los datos por medio de una señal de reloj [66].

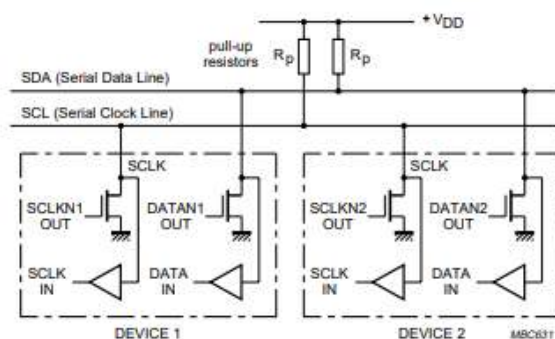


Figura 4.35: Comunicación bus i2c. [66]

Debido a la simplicidad del protocolo I2C y su forma de conexión en bus con diferentes dispositivos al mismo tiempo, se ha decidido su implantación para establecer una comunicación entre cuatro microcontroladores Arduino Nano dispuestos como esclavos y un microcontrolador Arduino Uno como maestro. Los Arduino nano son los encargados de procesar y enviar la posición angular del robot, al mismo tiempo que de recibir el esfuerzo de control hacia y desde el microcontrolador Arduino Uno, mientras tanto el microcontrolador Arduino Uno es el encargado de iniciar la comunicación I2C y de conectarse con el software de control.

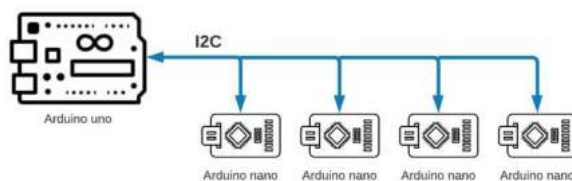


Figura 4.36: Conexión I2C microcontroladores.

4.6. Conexión eléctrica de componentes

Se describen y se esquematizan las conexiones físicas necesarias para la comunicación y la alimentación de los diferentes dispositivos electrónicos que permiten desarrollar la tarea de control para el robot H4, para facilidad de lectura se optó por dividir las conexiones en dos partes: conexión física del sistema de control y conexión física del sistema de potencia.

4.6.1. Conexión eléctrica del sistema de control

Las conexiones eléctricas del sistema de control para el robot H4 se caracterizan principalmente por contener todas las conexiones cableadas entre la tarjeta controladora y los sensores; así como la conexión necesaria para la comunicación I2C.

Como se observa en la figura 4.37 la conexión se compone de tres elementos principales que son: los sensores de posición representados por los potenciómetros, los microcontroladores esclavos representados por los Arduinos Nano y el microcontrolador maestro representado por el Arduino Uno.

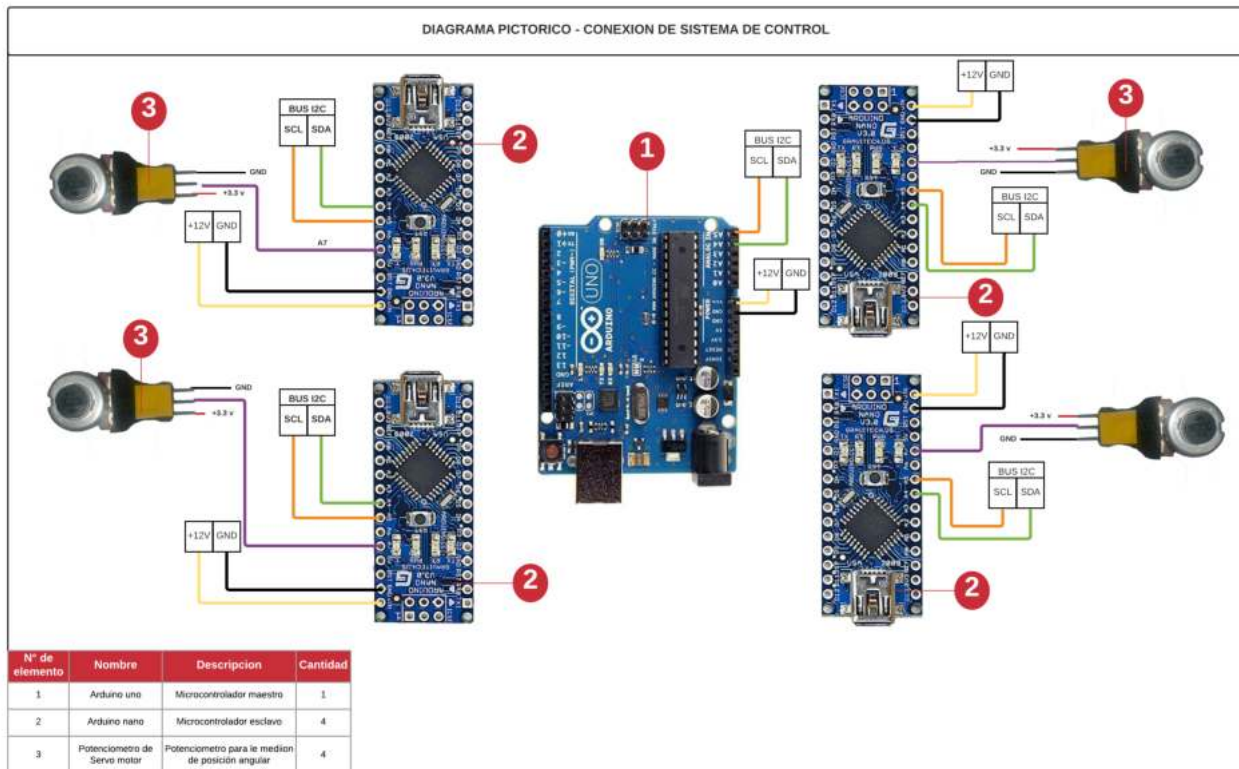


Figura 4.37: Conexión eléctrica del sistema de control

4.6.2. Conexión eléctrica del sistema de potencia

La conexión eléctrica del sistema de potencia del robot H4 retrata los diagramas de conexión utilizados para llevar la señal de esfuerzo de control suministrado por los Arduino Nano, escalarlo a la potencia necesaria y ejecutar el esfuerzo de control por medio de los actuadores.

En la figura 4.38 se muestran las conexiones entre los cuatro Arduino Nano, los dos módulos puente H y los moto-reductores como elemento final de control. Durante el flujo a través del diagrama los Arduino esclavos envían el esfuerzo de control en voltaje lógico (5V), los puentes H elevan la señal hasta los 12V y los moto-reductores ejecutan el esfuerzo de control.

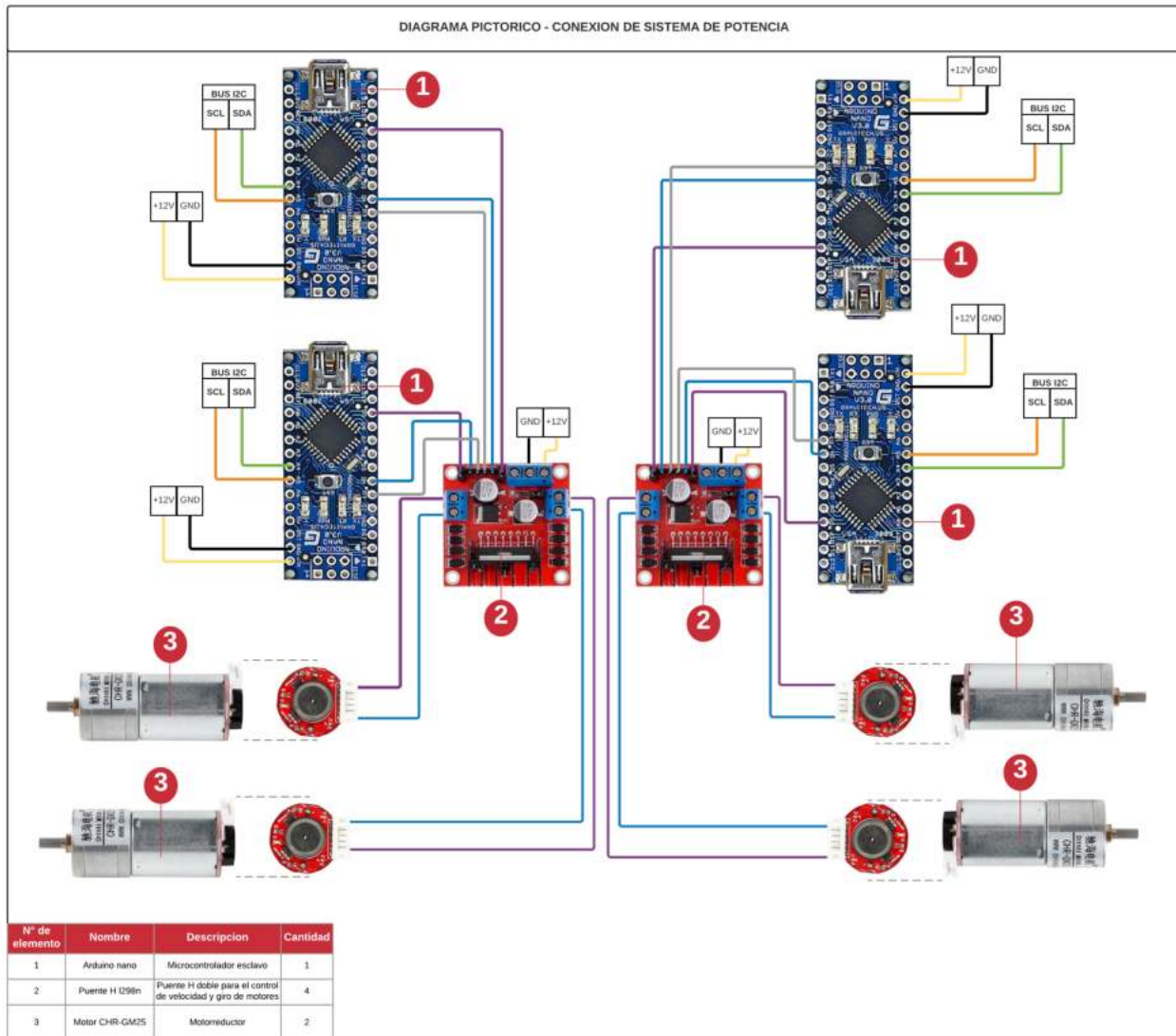


Figura 4.38: Conexiones eléctricas del sistema de potencia

4.6.3. Diseño en PCB para montaje electrónico

Los anteriores diagramas se materializan a través de una tarjeta de circuito impreso que aloja los distintos componentes electrónicos y transmiten las señales de entrada y salida hacia

borneras para una conexión segura y estable. En las figuras 4.39 y 4.40 se muestra la vista de componentes y el diagrama de conexiones contenido en la placa.

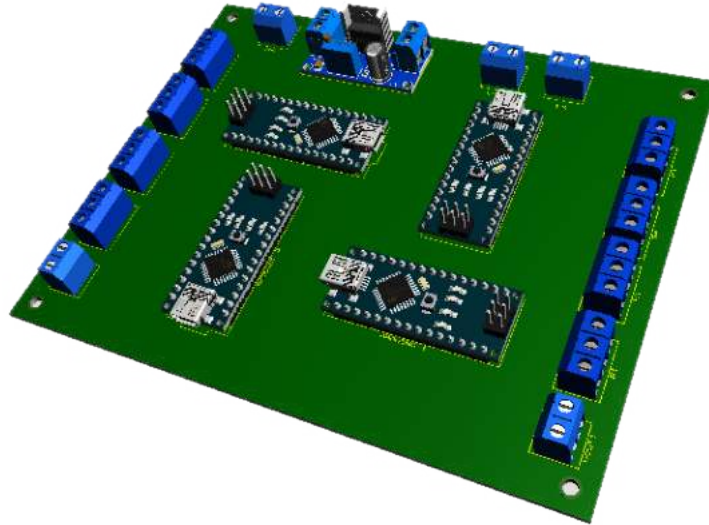


Figura 4.39: Diseño 3D de PCB.

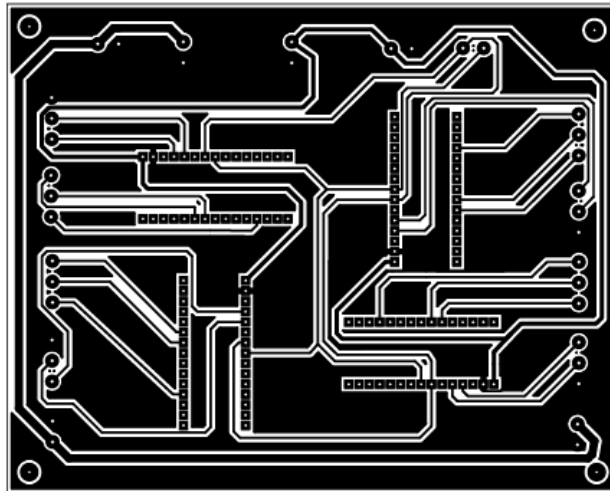


Figura 4.40: Diagrama de conexiones de PCB.

4.7. Implementación del prototipo

Para finalizar el contenido del capítulo se muestra la construcción final del prototipo dividiéndolo en: implementación de la estructura de soporte, ensamble de cadenas cinemáticas, montaje de la fase de potencia y montaje del sistema de control. De esta manera se concluye la construcción del prototipo experimental de un robot paralelo tipo H4 sobre el que se realizarán las pruebas de control PID y de control CTC.

4.7.1. Estructura de soporte

Se realizó la fabricación de la estructura de soporte planteada, trazando la ubicación de los soportes y preparando todo para el inicio de la construcción del robot. Los resultados de la estructura se muestran a continuación.



Figura 4.41: Estructura de soporte del robot.
(Vista Frontal)



Figura 4.42: Estructura de soporte del robot.
(Vista Lateral)



Figura 4.43: Estructura de soporte del robot. (Vista isométrica)

4.7.2. Ensamble de cadenas cinemáticas

Partiendo de la base rígida construida para el robot, se realiza la sujeción todos los soportes de antebrazo y soportes de motor, se introduce el alma en los antebrazos y se montan los antebrazos en los soportes. Finalmente se instalan los motores y los sensores para completar el montaje de la primera sección de las cadenas cinemáticas.



Figura 4.44: Vista de los soportes, antebrazos y motores (Vista Frontal)



Figura 4.45: Vista de los soportes, antebrazos y motores (Vista Lateral)



Figura 4.46: Vista de los soportes, antebrazos y motores (Vista Isométrica)

Posteriormente, se realiza el montaje de los brazos, a través de las juntas rotacionales de las barras se instala el tornillo pasante con sus respectivos separadores y se fija al agujero pasante de los antebrazos, esto mismo es realizado en los extremos finales acoplando las barras paralelas y las uniones T; finalmente las uniones T se fijan a la góndola (ver figuras 4.47, 4.48). Cada barra paralela tiene añadido cuatro soportes, dos en cada extremo permitiendo anclar cuatro tensores que restringen movimientos no deseados en las barras paralelas como se muestra en la figura 4.49



Figura 4.47: Acople barras paralelas extremo superior



Figura 4.48: Acople barras paralelas extremo inferior



Figura 4.49: Tensores de barras paralelas

4.7.3. Montaje de la fase de potencia y del sistema de control

Con las cadenas cinemáticas constituidas se procede a realizar el montaje de la electrónica con todas las conexiones necesarias etiquetando cada uno de los cables de entrada/salida de la placa y ubicando también los distintos módulos/componentes. Los resultados se muestran en la figura 4.50.

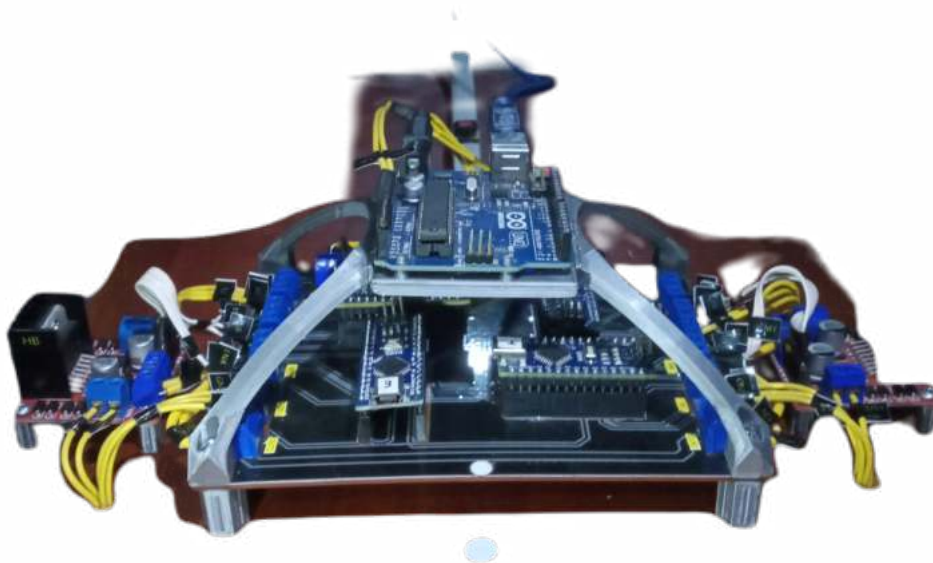


Figura 4.50: Sección electrónica ensamblada

4.7.4. Ajustes del comportamiento

Durante la implementación se encontraron dos comportamientos potencialmente no deseados que debieron ser estudiados y controlados como parte del proceso de puesta a punto del prototipo, dichos ajustes se muestran a continuación.

4.7.4.1. Ajuste de la respuesta del sistema de potencia

Como se evidenció anteriormente, el sistema de potencia esta compuesto por los módulos L298N y la fuente de alimentación que permiten alimentar y controlar los actuadores sin poner en riesgo el sistema de control.

Con el fin de obtener una respuesta adecuada del sistema para los actuadores, se realizaron diferentes pruebas en el ajuste de la señal PWM entregada por los controladores Arduino Nano, evidenciando que la frecuencia del ciclo de PWM afecta el comportamiento del voltaje de salida del puente H.

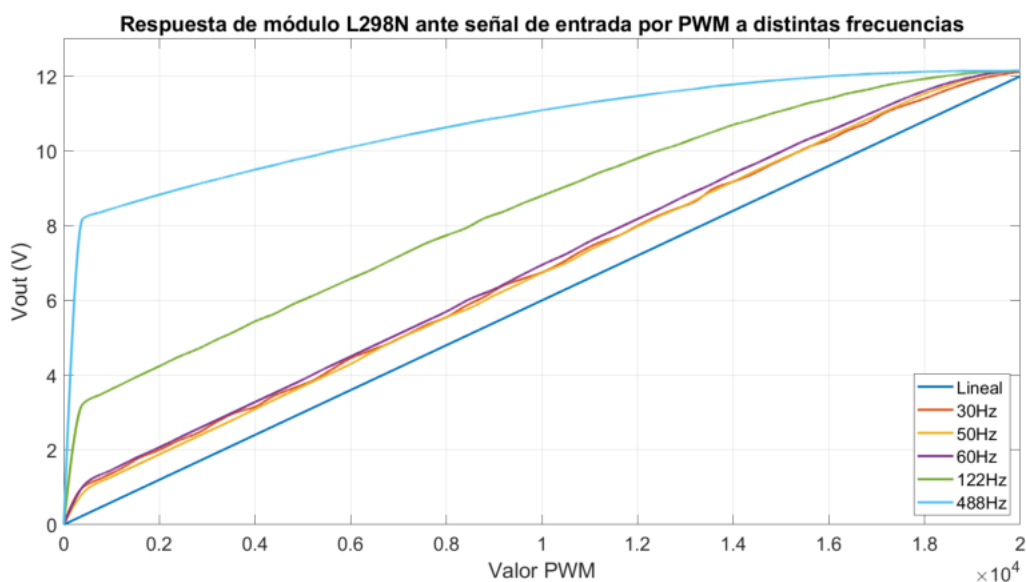


Figura 4.51: Voltaje de salida L298n ante diferentes frecuencias de PWM

Como se observa en la figura 4.51, a frecuencias de 488 Hz, es decir, en la frecuencia por defecto en el Arduino Nano en los pines 3, 5, 6, 9, 10 y 11, el voltaje de salida $V_{out}(V)$ describe un comportamiento logarítmico no deseado para el control de los actuadores. Por otro lado, a frecuencias bajas el voltaje de salida describe un comportamiento cada vez mas lineal cercano al comportamiento deseado hasta llegar a una frecuencia de 30Hz, donde se obtienen valores de lectura con altas oscilaciones en el voltaje medio medido.

De acuerdo a los datos obtenidos se decide trabajar a una frecuencia de 50Hz, punto en el que la señal tiene la mayor cercanía al comportamiento lineal sin presentar excesivas variaciones en las lecturas.

4.7.4.2. Filtrado de señales

Debido a la naturaleza del módulo conversor análogo/digital de las tarjetas arduino nano que actúa como sistema de recepción y transcripción de la señal de posición medida por los sensores, el sistema cuenta con una precisión de medida de 0.25° que al combinarse con la naturaleza analógica de los sensores producen saltos entre lecturas que inciden de manera negativa en el esfuerzo de control.

En el esfuerzo por posibilitar las condiciones de trabajo para los controladores se implementó dos filtros de señal a través de software, el primero es un filtro pasa bajo por medias móviles exponenciales que pondera el valor de lectura actual con el estado anterior del sistema, para reducir los cambios instantáneos de valor en la lectura sin afectar el comportamiento de la señal, el modelo usado es descrito por la ecuación 4.7.1

$$A_n = \alpha M + (1 - \alpha)A_n - 1 \quad (4.7.1)$$

A_n corresponde al valor filtrado, $A_n - 1$ al valor filtrado anterior, M es el valor muestreado de la señal a filtrar, y α es el coeficiente de ponderación, de un rango de 0 a 1, se determina en un valor de 0.3 para primar la velocidad de seguimiento por sobre el nivel de filtrado.

El segundo filtro implementado imita a través de software el comportamiento de un filtro RC a través de una función de transferencia de la forma:

$$H(S) = \frac{1}{S + \frac{1}{RC}} \quad (4.7.2)$$

Donde el valor del término $\frac{1}{RC}$ se estableció en 14.71, también en búsqueda de un comportamiento veloz para un filtro de los picos más fuertes minimizando el retraso en la información.

4.7.5. Implementación del sistema de control

Para la incorporación de los algoritmos de control necesarios, se ha decidido usar como software de control el toolbox Simulink de Matlab, que se encuentra basado en un entorno de bloques para el modelado y simulación de sistemas dinámicos [67]. Con la integración del paquete de soporte para Arduino de matlab, se logró establecer la conexión entre el Arduino Uno y el

software de control. Además, el paquete de soporte para Arduino, cuenta también con módulos para la comunicación i2c haciendo posible la comunicación entre los microcontroladores Arduino Nano como se explicó en la sección 4.5.

4.7.5.1. Configuración del software de control

Para establecer la comunicación I2C entre Simulink y los microcontroladores, se usaron los bloques “Master Read” y “byte unpack” (ver figura 4.52) encargados de leer los datos de posición entregados por los microcontroladores esclavos; y los bloques “Master write” y “byte pack” (ver figura 4.53) para enviar hacia los microcontroladores esclavo el esfuerzo de control necesario.

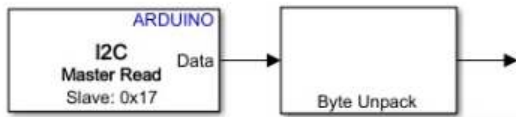


Figura 4.52: Bloques lectura de datos I2C

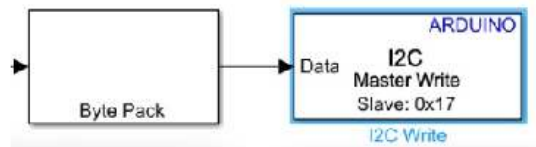


Figura 4.53: Bloques escritura de datos I2C

Para configurar de manera adecuada la lectura de la posición enviada a través de I2C, se le asignó al bloque “Master read” los parámetros de dirección de esclavo (específico para cada esclavo), orden de los bytes (LittleEndian), tipo de dato (uint8) y el tamaño del vector de los datos como se muestra en la figura 4.54. Al bloque de “byte unpack” se configuró el parámetro del tipo de salida de dato (ver figura 4.55) que permite desempaquetar la trama de datos recibida por el bloque “Master read” y convertirla en datos int32.



Figura 4.54: Configuración bloque “Master read”

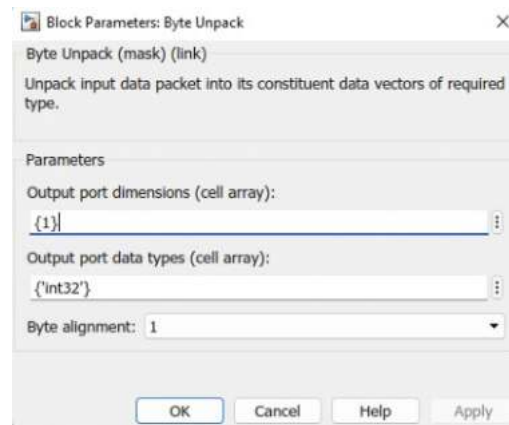


Figura 4.55: Configuración bloque “Byte unpack”

En el bloque “Byte pack” se configuró el parámetro “tipo de salida de dato” (ver figura 4.56) para empaquetar los datos que llegan del software de control Simulink de tipo int32 a tipo uint8. Luego se configuró los parámetros dirección de esclavo (específico para cada esclavo) y el orden de los bytes (LittleEndian) para el bloque “Master write” como se muestra en la figura 4.57.

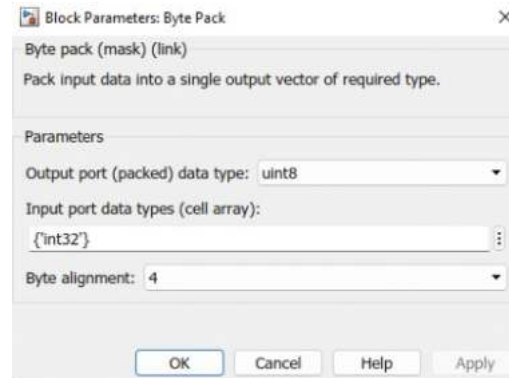


Figura 4.56: Configuración bloque “Byte pack”

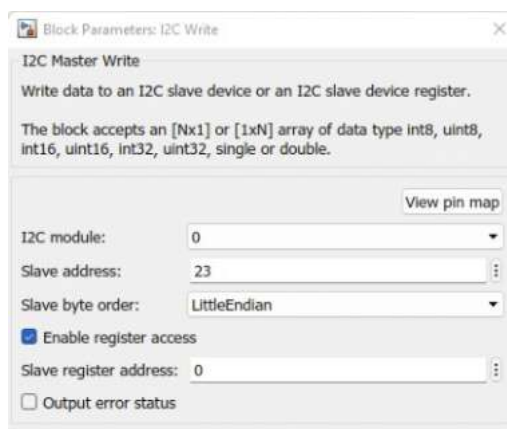


Figura 4.57: Configuración bloque “Master write”

4.7.5.2. Configuración de microcontroladores esclavo

Desde el entorno de programación de Arduino IDE, se realizó la programación de los microcontroladores Arduinos Nano en lenguaje C++ mediante un cable de datos microusb, además se incluyó la librería “wire.h” proporcionada por Arduino que permite establecer comunicación I2C entre diferentes dispositivos.

Una vez instalada la librería se procedió a desarrollar el código necesario para la comunicación serial I2C, donde se establece una dirección diferente para cada esclavo en el rango de de 0x0 a 0x40000. Luego se establecen dos eventos, el primero nombrado como “requestEvent” que permite recibir los datos desde el maestro y el segundo como “receiveEvent” para enviar los datos hacia el maestro como se muestra en la figura 4.58.

```
//inicializacion i2c
Wire.begin(0x17);
Wire.onRequest(requestEvent);
Wire.onReceive(receiveEvent);
```

Figura 4.58: Inicialización I2C Arduino

Cada uno de los eventos se compone por una función que se activará cada vez que se reciba o se envíe un mensaje por medio del canal de comunicación I2C. La función “requestEvent” es la encargada de enviar los datos al dispositivo maestro, para realizar el proceso de transmisión es necesario que los datos sean empaquetados como un tipo de dato uint8 y enviados por la función “wire.write” proporcionada por la librería wire.h (ver figura 4.59), en sentido opuesto, la función “receiveEvent” se encarga de recibir los mensajes enviados por el Microcontrolador

maestro, esta función observa si ha llegado un mensaje y realiza el desempaquetado del mensaje tipo uint8 a int leyendo byte por byte con la función “wire.read”, concatenando y haciendo la conversión de tipo de dato (ver figura 4.60).

```
void requestEvent()
{
    poten=potenciometro();
    po=poten*100000;
    Wire.write((byte*)&po, sizeof(po));
}
```

Figura 4.59: Función envío de datos a través de I2C.

```
void receiveEvent (int bytes){

    pwm = 0;
    uint8_t index = -1;
    while (Wire.available())
    {
        byte* pointer = (byte*)&pwm;
        *(pointer + index) = (byte)Wire.read();
        index++;
    }
}
```

Figura 4.60: Función de lectura de datos a través de I2C.

4.7.6. Interfaz de usuario

Con el propósito de facilitar la interacción entre el usuario y el prototipo se desarrolló la interfaz gráfica que se observa en la siguiente figura:

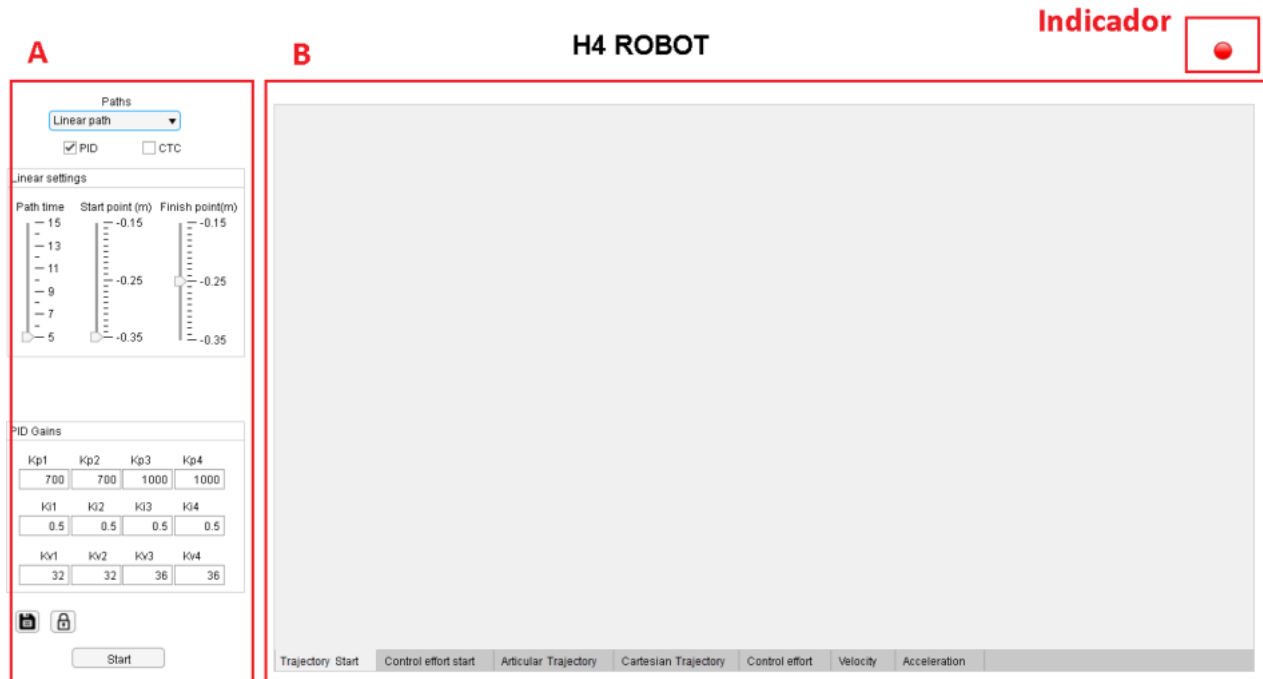


Figura 4.61: Interfaz de usuario.

La interfaz gráfica de usuario está dividida en dos segmentos (A y B). El segmento A, ubicado en la zona izquierda de la interfaz contiene los siguientes elementos: Un cuadro de selección de trayectorias “Paths”, dos botones donde se puede elegir el tipo de estrategia de control a implementar, un panel de configuración de trayectorias, un panel de ajustes de ganancias, botón de guardado, botón de bloqueo/desbloqueo de ganancias y por ultimo un botón de inicio “Start” que permite ejecutar la trayectoria seleccionada con los parámetros que hayan sido configurados.

El segmento B es compuesto por el área de visualización que permite mostrar los resultados del seguimiento de trayectoria efectuada por el robot, este segmento está compuesto por siete pestañas, cada una accesible desde la parte inferior del área de y se proceden a describir a continuación:

- Trajectory Start: Esta pestaña permite visualizar el seguimiento en términos articulares de la trayectoria de inicialización del sistema, se trata de una consigna adaptable calculada por software para llevar el prototipo del estado en el que se encuentre a la posición de inicio de la trayectoria solicitada (ver figura 4.62), esta trayectoria se estudia en profundidad en el capítulo 5.

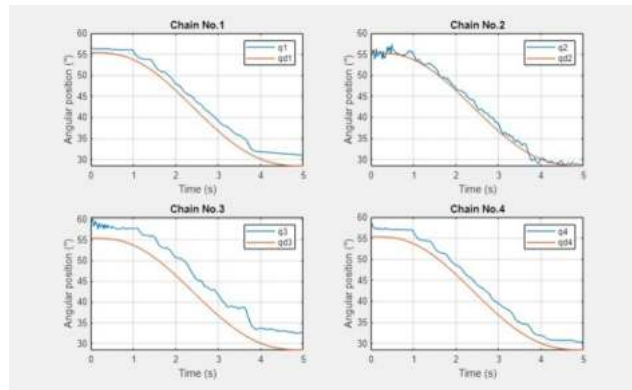


Figura 4.62: Trajectory Start.

- Control effort start: Como se observa en la figura 4.63, en esta pestaña es posible visualizar el esfuerzo de control enviado por el algoritmo de control hacia cada uno de los actuadores que son denominados como control effort 1, 2, 3 y 4.

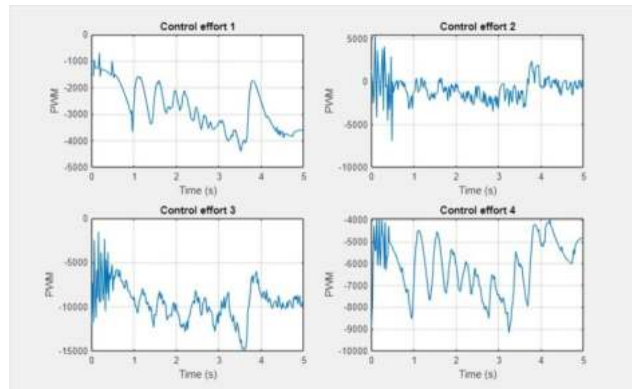


Figura 4.63: Control effort start.

- Joint trajectory: Se visualiza el seguimiento de la trayectoria seleccionada en el cuadro de selección de trayectoria trazando en azul la consigna articular deseada y en rojo la obtenida.

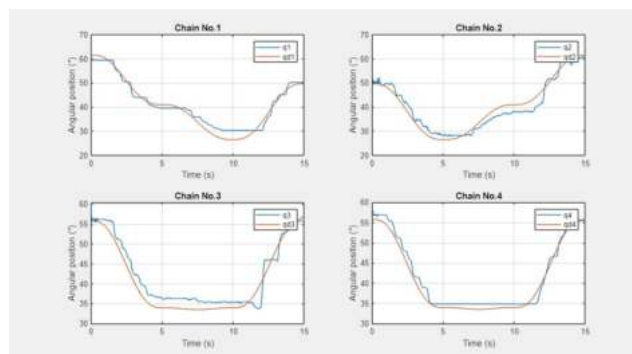


Figura 4.64: Joint trajectory.

- Cartesian trajectory: Muestra el seguimiento de la trayectoria ejecutada por el robot contra la consigna deseada en un espacio cartesiano (ver figura 4.65).

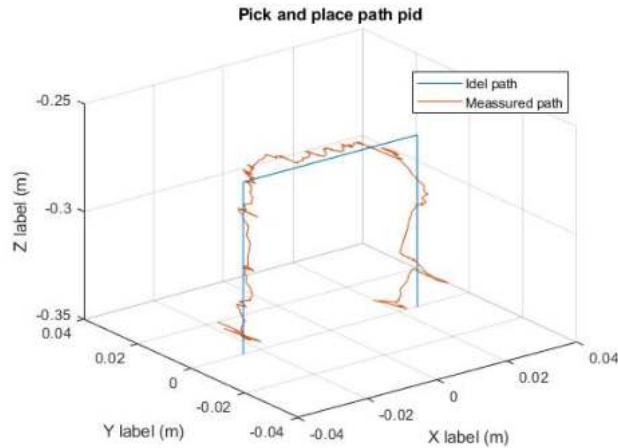


Figura 4.65: Cartesian trajectory.

- Velocity: En esta pestaña se puede observar la respuesta en términos de la velocidad desarrollada por el robot de cada actuador tomando como base referencial la consigna de velocidad deseada como se observa en la figura 4.66.

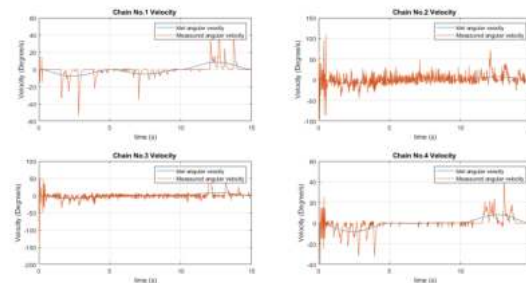


Figura 4.66: Velocity.

- Acceleration: Permite visualizar las aceleraciones efectuadas por cada actuador del robot sobre la consigna de aceleración deseada (ver figura 4.67).

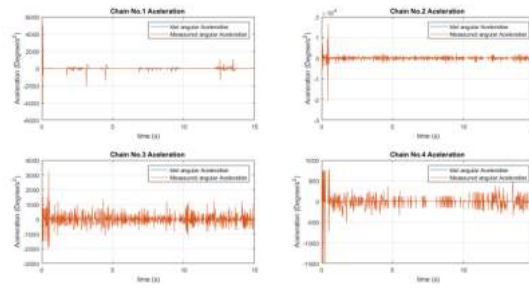


Figura 4.67: Acceleration.

Adicionalmente en la parte superior derecha de la interfaz se encuentra un indicador de estado que indica mediante colores el estado actual del sistema: Color rojo si el robot se encuentra desconectado o en estado de espera y color verde si está ejecutando la acción designada por el usuario.

4.7.7. Resultados de implementación

Con esto se da por finalizado el proceso de desarrollo del prototipo de robot paralelo H4 sobre el que se realizará la implementación y prueba de las estrategias de control. Como resultado del proceso de ensamblaje, se presenta en las figuras 4.68, 4.69 y 4.70 la evidencia fotográfica del ensamblaje físico realizado.



Figura 4.68: Robot H4 implementado, vista frontal.



Figura 4.69: Robot H4 implementado, vista lateral.



Figura 4.70: Robot H4 implementado, isométrica.

4.7.8. Consideraciones finales sobre el prototipo

El prototipo fue desarrollado para proporcionar una plataforma escalable, versátil y asequible para trabajos de experimentación e investigación en torno a la robótica paralela. El resultado obtenido da respuesta a estos requerimientos, siendo capaz de poner a prueba diferentes estrategias de control y de adaptarse a cambios de geometría, estructura o función con un mínimo esfuerzo.

Todo el desarrollo tuvo un costo de fabricación de aproximadamente 400.000 - 450.000 pesos colombianos, equivalentes a aproximadamente 100 dólares estadounidenses, ubicándose en un tercio del costo de las alternativas más económicas comercialmente disponibles como puede ser el Delta X Basic Kit, con un valor de 299 dólares [31].

También es necesario señalar que al tratarse de una primera versión del robot, se identificaron varios puntos destacables para proponer caminos de actualización y mejora en el comportamiento del sistema en futuras versiones así como consideraciones que abarcan desde sistemas de control evaluados pero no seleccionados hasta aspectos mecánicos con incidencia en el comportamiento del robot.

4.7.8.1. Consideraciones del sistema de control

Durante el desarrollo del robot se consideraron distintas alternativas para poder implementar las estrategias de control donde destaca el uso de una tarjeta RaspberryPi para la implementación de las estrategias, encontrando limitantes en la capacidad de respuesta de dicha tarjeta ante el manejo de múltiples señales simultáneas. A futuro, se recomienda la implementación de tarjetas de adquisición de datos dedicadas para posibilitar la mejora de la instrumentación sin sacrificar los tiempos de respuesta del sistema.

4.7.8.2. Consideraciones del sistema mecánico

Acerca del aspecto mecánico del prototipo se señala la incidencia de los tornillos sin fin que si bien permiten tener una gran reducción de velocidad y una gran ganancia en torque para posibilitar el movimiento del robot y aportar una alta independencia con respecto a la incidencia de la gravedad, generan como consecuencia negativa un empuje axial en la transmisión y una elevación de la complejidad cuando las trayectorias articulares presentan un punto de inflexión en la consigna de seguimiento. En consecuencia, se recomienda la implementación de mayores ratios de reducción mediante piñonería interna, eliminando a ser posible la necesidad de tornillos sin fin en futuras versiones.

4.7.8.3. Consideraciones sobre los sensores

En este apartado se encuentran dos consideraciones importantes, primeramente los sensores implementados representan un sistema sencillo y eficiente para la medición de las posiciones angulares, sin embargo en futuras versiones es aconsejable actualizar estos elementos a sistemas

de mayor linealidad y mayor precisión sin necesidad de procesos de calibración y linealización de la medida.

Por otra parte se recomienda la implementación de nuevos sistemas de retroalimentación de los lazos de control, especialmente en estrategias de medición cartesiana sobre el órgano terminal del robot, ya sean sistemas de medición absoluta como sistemas de visión máquina o sistemas de medición relativos a través del uso de sensores inerciales.

4.7.8.4. Consideraciones sobre el modelo 3D

El modelo 3D desarrollado representa con alta precisión y fiabilidad el comportamiento del sistema, todas las piezas que inciden a nivel geométrico y dinámico en los movimientos del prototipo están modeladas con fidelidad y pueden adaptarse a cambios de disposición para complementar el estudio del sistema desarrollado en futuros trabajos.

CAPÍTULO 5

PRUEBAS Y RESULTADOS

Contenido del capítulo

5.1. Aspectos preliminares	110
5.1.1. Marco de referencia	110
5.1.2. Trayectorias establecidas	111
5.1.3. Trayectoria de inicialización	113
5.2. Parámetros geométricos y dinámicos	114
5.3. Sintonización de controladores	115
5.3.1. Sintonización de control PID	115
5.3.2. Sintonización del controlador CTC	115
5.4. Desempeño de control PID y CTC	116
5.4.1. Desempeño del control PID Y CTC en trayectoria lineal	116
5.4.2. Desempeño de control PID Y CTC en trayectoria triangular	122
5.4.3. Desempeño de control PID Y CTC en trayectoria pick and place	128
5.5. Análisis de robustez de las estrategias de control PID y CTC	134
5.5.1. Análisis interpretativo	134
5.5.2. Análisis cuantitativo	135

En este capítulo se aborda la documentación correspondiente a las pruebas de las estrategias de control implementadas al robot, específicamente control PID y CTC. El capítulo se divide en 3 secciones: aspectos preliminares, pruebas y resultados con control PID y pruebas y resultados con control CTC dando respuesta a los objetivos específicos planteados en este trabajo de grado.

5.1. Aspectos preliminares

Como paso inicial para realizar las pruebas de seguimiento de trayectorias y evaluar comparativamente el desempeño de los controladores es necesario definir y caracterizar las pruebas que se realizarán; el marco de referencia para mediciones y las consignas a ser realizadas.

5.1.1. Marco de referencia

Se considera un marco de referencia común el punto en que todos los actuadores rotacionales se encuentran en una posición angular de cero grados, es decir dejando los antebrazos de las cadenas cinemáticas con una disposición paralela a la base rígida del robot como se puede ver en las figuras 5.1 y 5.2. Con la escala de medición articular definida, se configuró el punto de origen del sistema de coordenadas en el punto medio de la H que conforma la góndola, en el punto de cruce entre las diagonales de las cadenas opuestas.



Figura 5.1: Robot H4 propuesto en posición inicial, vista frontal.



Figura 5.2: Robot H4 propuesto en posición inicial, vista lateral.

5.1.2. Trayectorias establecidas

En relación a las trayectorias deseadas se plantea como requerimiento el seguimiento de tres consignas diferentes: Lineal, Triangular y Pick and place.

5.1.2.1. Trayectoria lineal

Se trata de una trayectoria con geometría lineal de comportamiento grado cinco, en la que el órgano terminal se eleva a través del eje Z desde -0.35cm hasta -0.25cm mientras se mantienen invariantes las coordenadas de los ejes X y Y, durante el desplazamiento las 4 cadenas del robot trabajan de forma conjunta para elevar el órgano terminal, como primera trayectoria evalúa el comportamiento en contra de la fuerza de la gravedad y la coordinación de los actuadores para no perder el punto de seguimiento en X e Y. La trayectoria deseada se muestra a continuación.

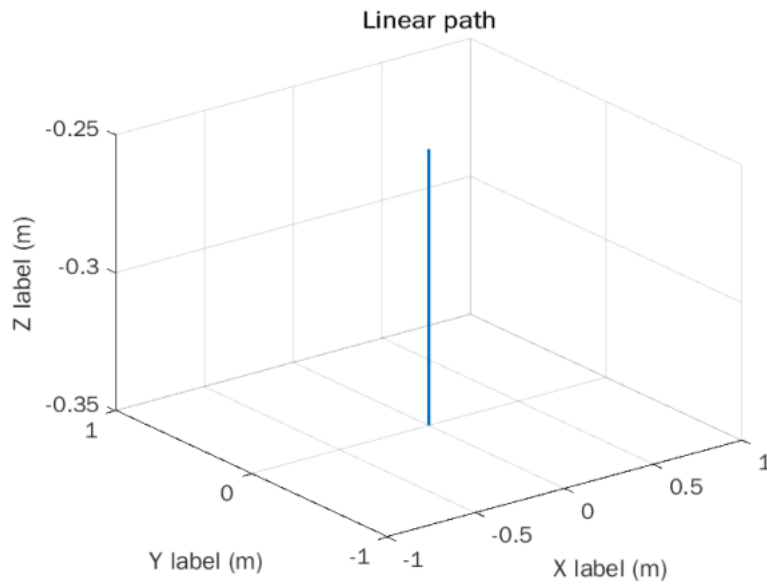


Figura 5.3: Trayectoria lineal.

5.1.2.2. Trayectoria Triangular

Se trata de una trayectoria con geometría triangular en el plano XY de comportamiento grado cinco. Se mantiene invariante el valor de consigna para el eje Z en -0.35cm con lo cual cada cadena debe trabajar de forma independiente para trazar la trayectoria deseada, se evalúa un punto crítico en el comportamiento del robot como lo es el cambio de sentido en los desplazamientos. La trayectoria deseada se muestra a continuación.

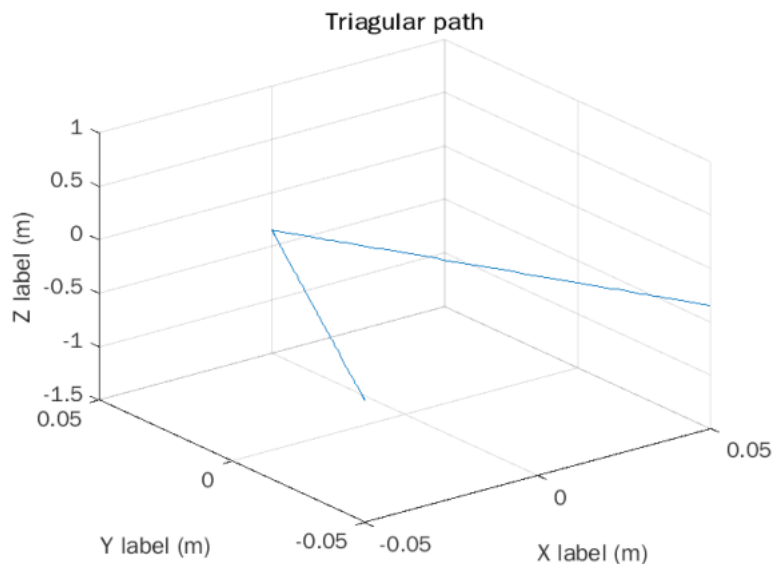


Figura 5.4: Trayectoria triangular.

5.1.2.3. Trayectoria Pick and place

Como trayectoria final se emulan las necesidades de una trayectoria de tipo *pick and place* donde se juntan los comportamientos deseados de las dos trayectorias anteriores. Inicialmente el órgano terminal se desplaza positivamente en el eje Z emulando el comportamiento tras haber recogido un elemento en un hipotético proceso productivo, posteriormente el robot desplaza este elemento a través del plano XY manteniéndose invariante para Z hasta alcanzar la ubicación de destino y finalmente el órgano terminal desciende sobre el eje Z para posicionar nuevamente el elemento recogido en su ubicación final. La trayectoria deseada se muestra a continuación.

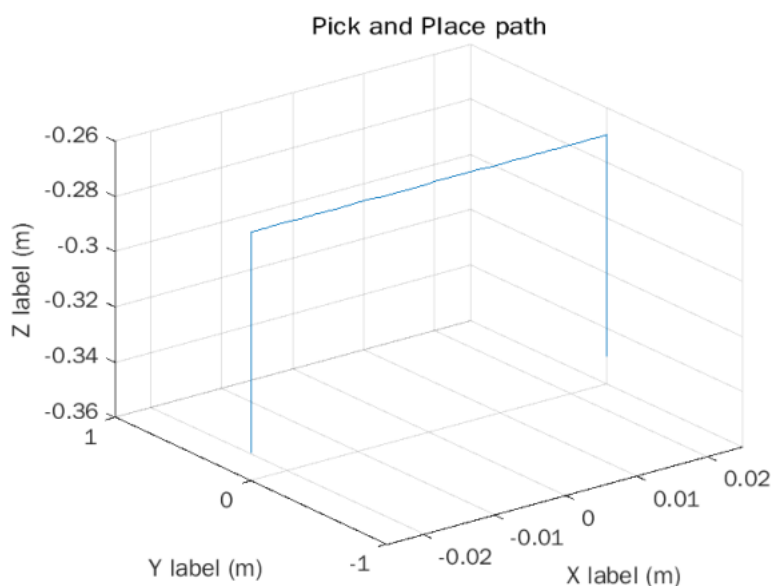


Figura 5.5: Trayectoria Pick and Place.

5.1.3. Trayectoria de inicialización

Con propósito de garantizar la estandarización en los seguimientos de trayectorias y sobre todo de no generar cambios instantáneos en la posición del robot se diseñó un algoritmo capaz de generar trayectorias adaptativas para llevar el robot desde cualquier punto hasta el punto de inicio de la trayectoria seleccionada a través de consignas lineales. Una de estas trayectorias de inicialización se ve reflejada a continuación.

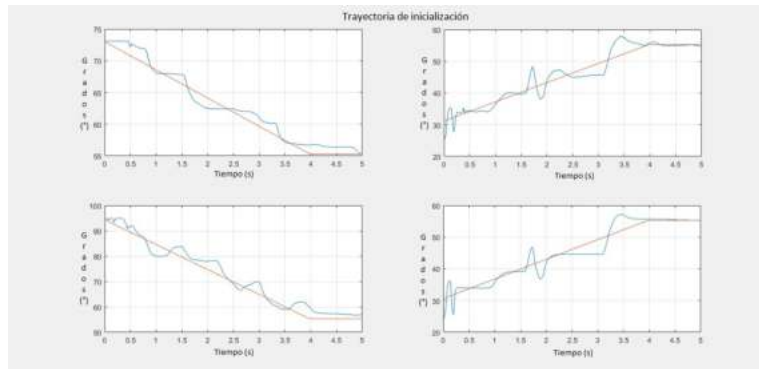


Figura 5.6: Trayectoria de inicialización

Durante las pruebas, se logró un comportamiento satisfactorio en la ejecución de la trayectoria de inicialización, que si bien no alcanza un posicionamiento ideal, permite un inicio controlado de las trayectorias a evaluar.

5.2. Parámetros geométricos y dinámicos

Los parámetros geométricos y dinámicos usados para el diseño de los controladores se pueden evidenciar en las tablas 5.1 y 5.2, la primera de ellas, contiene los parámetros geométricos del robot usados en los modelos: Disposición de los motores, dimensiones de brazos, antebrazos y H. La segunda tabla abarca los parámetros dinámicos del robot: Masas e inercias.

Para los valores inerciales se tomó como referencia los valores estudiados por Vivas [3]. Dichos valores se escalaron proporcionalmente en un ratio de 1.75:1 de acuerdo a las diferencias de tamaño entre el robot del estudio mencionado y el prototipo construido.

Parámetro	Descripción	Valor	Unidad
L	Longitud de los brazos	0.279	m
l	Longitud de los antebrazos	0.155	m
h	Longitud de la barra central de la H	0.035	m
d	Longitud de las barras laterales de la H	0.035	m
R	Longitud de disposición de motores	0.08	m
α_1	Posición angular de motor 1	$3\pi/2$	rad
α_2	Posición angular de motor 2	$3\pi/2$	rad
α_3	Posición angular de motor 3	π	rad
α_4	Posición angular de motor 4	0	rad

Tabla 5.1: Parámetros geométricos.

Parámetro	Descripción	Valor	Unidad
M_h	Masa de la barra central de la H	0.0169	Kg
M_d	Masa de las barras laterales de la H	0.05815	Kg
I_h	Inercia de la barra central de la H	0.001/1.75	Nm^2
I_d	Inercia de las barras laterales de la H	0.002/1.75	Nm^2
I_l	Inercia de los antebrazos	0.012/1.75	Nm^2
I_{mot}	Inercia de los motores	0.01/1.75	Nm^2

Tabla 5.2: Parámetros dinámicos.

5.3. Sintonización de controladores

Para cada esquema de control se hace necesario sintonizar las ganancias, haciendo uso del método experimental de prueba y error, iniciando en valores bajos de ganancias hasta lograr una respuesta satisfactoria en el seguimiento de las consignas para las trayectorias dadas. Este proceso se describe a continuación.

5.3.1. Sintonización de control PID

Para la sintonización del control PID, se realizó variaciones en las ganancias P (Proporcional), I (Integral) y D(Derivativa) de manera progresiva desde un valor bajo hasta llegar a valores que permitiera al robot hacer un seguimiento de trayectoria adecuada, evitando tener una respuesta oscilatoria. Como resultado de la sintonización, se observó que para diferentes trayectorias, los valores de las ganancias para el control PID tuvieron variaciones como se evidencia en la tabla 5.3.

Trayectoria	Ganancia P	Ganancia I	Ganancia D
Lineal	1400, 1400, 2285, 2700	0, 0, 0, 0	30, 30, 45, 45
Triangular	1700, 2100,2700,300	110,70,10,10	170,120,50,50
Pick and place	1400, 1400, 2500, 2700	10, 10, 10, 10	14, 13, 15, 10

Tabla 5.3: Ganancias PID

5.3.2. Sintonización del controlador CTC

Para la sintonización del control CTC, al igual que la sintonización de control PID se realizó el proceso de sintonización mediante pruebas y errores, ajustando los valores de ganancia proporcional y ganancia derivativa como se ve en la tabla 5.4).

También se realizaron variaciones en las ganancias de acuerdo a la trayectoria a ejecutar pero esta variación es porcentualmente menor entre las distintas trayectorias.

Trayectoria	Ganancia P	Ganancia D
Lineal	$5,3e^{+6}$, $4,8e^{+6}$, $8,2e^{+6}$, $7,8e^{+6}$	$1,5e^{+5}$, $1,5e^{+5}$, $2,25e^{+5}$, $2,25e^{+5}$
Triangular	$5,3e^{+6}$, $4,8e^{+6}$, $8,2e^{+6}$, $7,8e^{+6}$	$1,5e^{+5}$, $1,5e^{+5}$, $2,4e^{+5}$, $2,35e^{+5}$
Pick and place	$5,5e^{+6}$, $4,8e^{+6}$, $8,3e^{+6}$, $7,8e^{+6}$	$1,5e^{+5}$, $1,5e^{+5}$, $2,25e^{+5}$, $2,25e^{+5}$

Tabla 5.4: Ganancias CTC

En este punto, se cuenta con las dos estrategias de control implementadas, sintonizadas y listas para las pruebas a realizar, por tanto, se da cumplimiento al primer objetivo específico del presente trabajo de grado: "Implementar las estrategias de control CTC y PID sobre un robot paralelo H4."

5.4. Desempeño de control PID y CTC

La presente sección plasma los resultados obtenidos de la implementación del control CTC y PID en el prototipo de robot H4 frente al seguimiento de diferentes trayectorias, ilustrando el comportamiento en términos de posición articular, cartesiano, comportamiento en velocidad y comportamiento en aceleración.

Es importante señalar que debido a la ausencia de sensores que permitan realizar mediciones de velocidad en el órgano terminal del robot, estos valores se obtuvieron a partir de los datos de lectura de posición articular en el inicio de las cadenas cinemáticas. Como consecuencia, es posible encontrar diferencias introducidas por el modelo geométrico directo utilizado al ser calculado por métodos numéricos.

5.4.1. Desempeño del control PID Y CTC en trayectoria lineal

Se evalúa la respuesta del sistema ante la primera trayectoria buscando el mayor grado de correspondencia entre consigna y valor obtenido para evaluar su rendimiento bajo criterios cuantificables y visuales.

5.4.1.1. Análisis de precisión de control PID y CTC

En la figura 5.7 se observa el seguimiento de trayectoria lineal con control PID en espacio cartesiano mostrando el seguimiento de consigna para los requerimientos dados.

Se obtiene un seguimiento correcto en términos de comportamiento aunque con un desfase recurrente hacia el segmento positivo del eje Y, dicho desfase se mantiene inferior a 1cm en casi la totalidad de la gráfica, evidenciando el constante intento del controlador por compensar este comportamiento.

De acuerdo a los resultados obtenidos, también se plasma el error cuadrado a través del seguimiento de la consigna (ver figura 5.8); el valor de error es considerablemente más alto al inicio del tramo recto donde se debe realizar la corrección entre el punto de finalización de la trayectoria inicial y el primer dato de la trayectoria evaluada.

Posteriormente el valor de error disminuye, fluctuando entre mínimos de 0.5cm y máximos de 0.9cm a través de la trayectoria. Cuantificando dicho error medio cuadrático en todo el seguimiento de la consigna se obtiene un valor de 0.0105m.

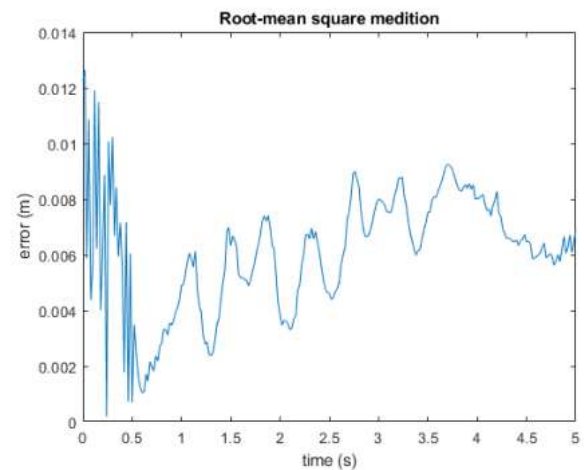
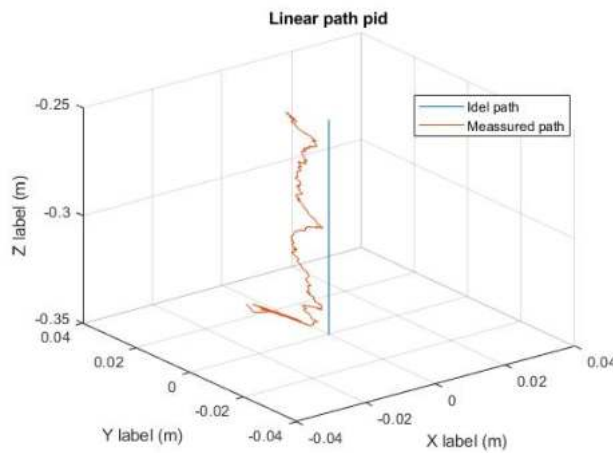


Figura 5.7: Seguimiento de trayectoria lineal con PID

Figura 5.8: Error medio cuadrático trayectoria lineal con PID

Se muestra también en la figura 5.9 el seguimiento de la consigna en términos articulares, mostrando el comportamiento de cada uno de los brazos. Dado que cada uno de los brazos obedece a una ley de control independiente y a las características únicas de cada cadena cinemática, se visualizó diferencias entre los movimientos idealmente coordinados.

La cadena No.2 es la que presenta el mejor seguimiento de consigna en términos de error, las número 1 y 4 le siguen, presentando un desfase de seguimiento y la cadena No.3 se queda atrás con un mayor desfase a lo largo de toda la trayectoria.

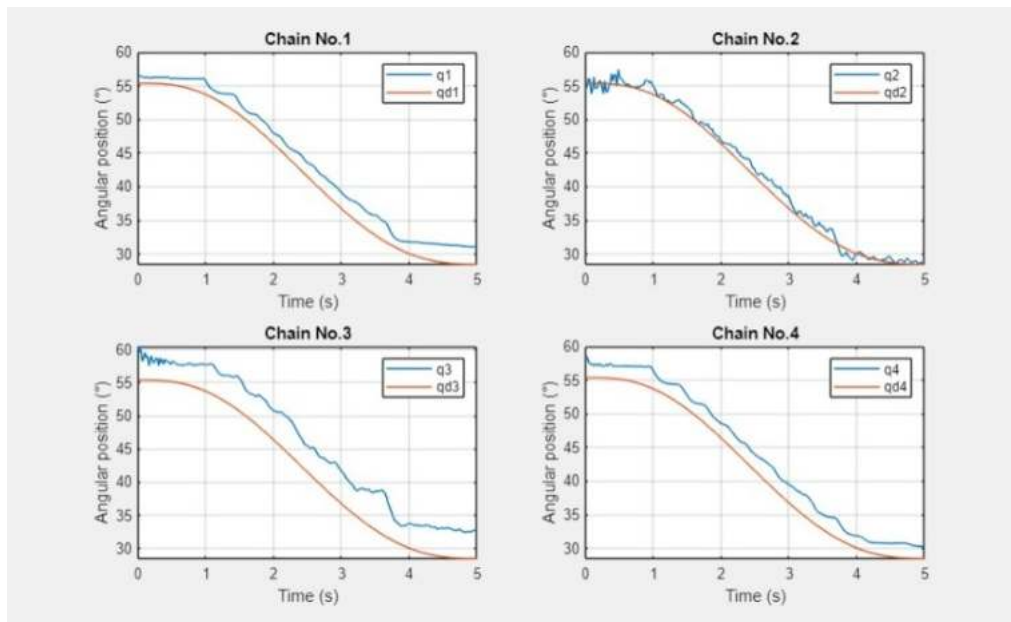


Figura 5.9: Consignas articulares deseadas vs obtenidas con PID

En la figura 5.10 se observa el seguimiento de trayectoria lineal con control CTC en espacio cartesiano mostrando el seguimiento de consigna para los requerimientos dados.

El comportamiento obtenido es similar al de control PID, con la compensación inicial de la diferencia cartesiana en el momento inicial de la operación y un posterior seguimiento correcto en el comportamiento, pero desfasado hacia el segmento positivo del eje Y. Dicho desfase se asocia a la geometría del robot, debido a la disposición de dos cadenas en ángulo de 270° que presenta una fuerza de empuje recurrente que el controlador intenta compensar.

Se acompaña de la imagen 5.11 donde se plasma el error cuadrático a través del seguimiento de la consigna; el valor de error es considerablemente más alto al inicio del tramo recto donde se debe realizar la corrección entre el punto de finalización de la trayectoria inicial y el primer dato de la trayectoria evaluada.

De manera posterior el valor de error oscila entre mínimos de 0.6cm y 1.1cm mientras la ejecución va avanzando a través del tiempo. Cuantificando en error medio cuadrático, en todo el seguimiento de la consigna se obtiene un valor de 0.0088m.

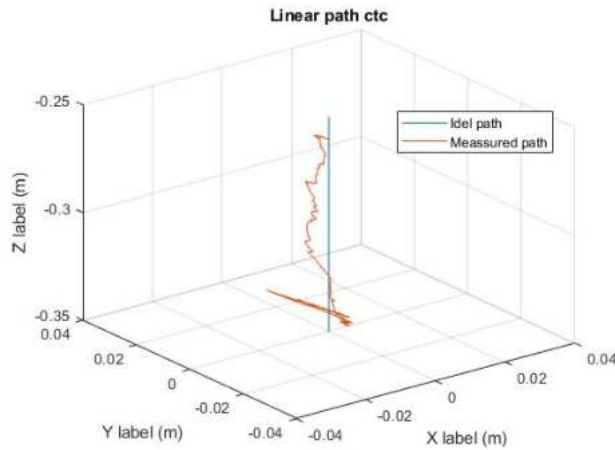


Figura 5.10: Seguimiento de trayectoria lineal con CTC

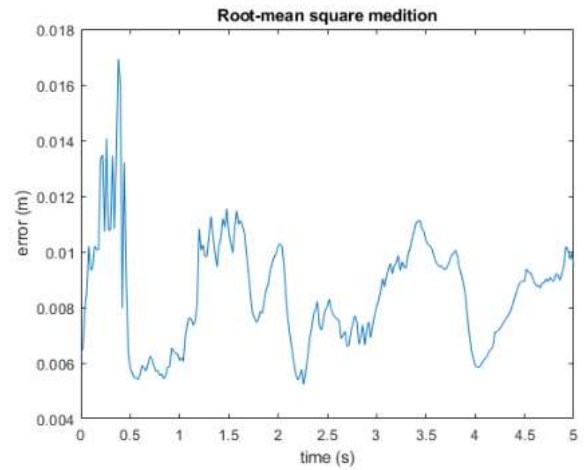


Figura 5.11: Error medio cuadrático trayectoria lineal con CTC

Se muestra también el seguimiento de la consigna en términos articulares, mostrando el comportamiento de cada uno de los brazos. En el control CTC los brazos número 1, 3 y 4 presentan mejores resultados visuales, realizando un control de trayectoria angular más preciso y acertado.

Se encuentra divergencia entre los resultados obtenidos del seguimiento cartesiano, del error medio cuadrático y del seguimiento articular. En este último los resultados son claramente superiores para el controlador CTC, mientras que en el seguimiento cartesiano se observa un comportamiento más preciso de parte del control PID, esta diferencia se asocia a la obtención de la posición angular a través de medición directa y la cartesiana a través de cálculos con el modelo cinemático directo del robot.

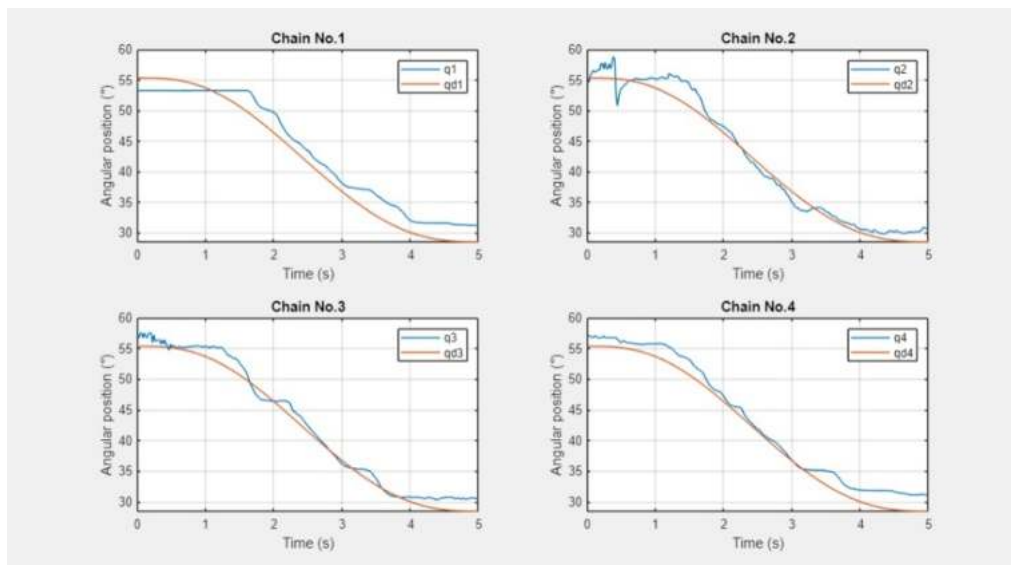


Figura 5.12: Consignas articulares deseadas vs obtenidas con CTC

5.4.1.2. Análisis de velocidad del control PID y CTC

Dando cumplimiento a los objetivos planteados se calcula el comportamiento de velocidad deseada contra velocidad obtenida para las dos estrategias de control, los resultados se muestran en las figuras 5.13 y 5.14.

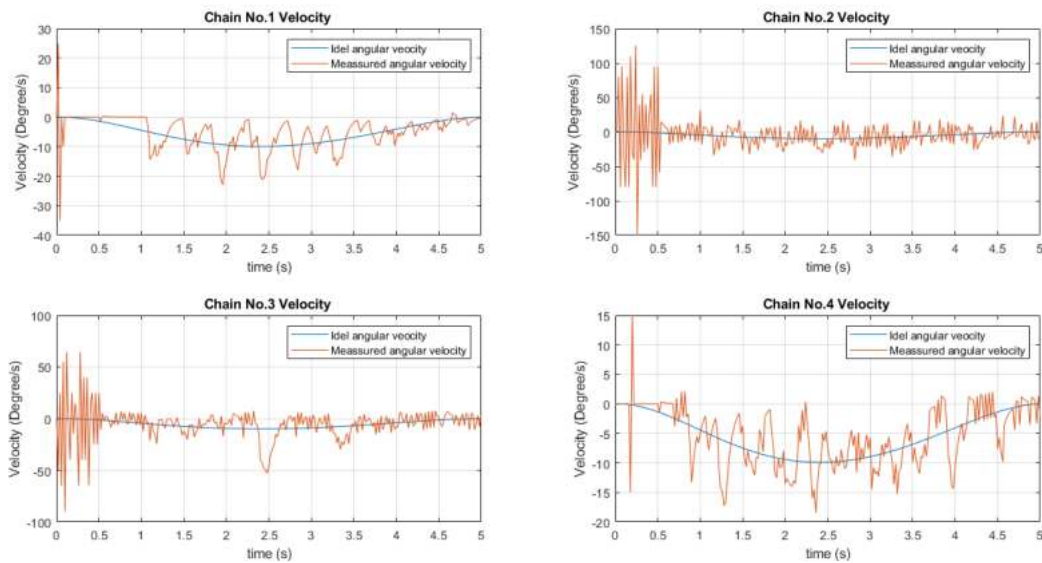


Figura 5.13: Velocidad articular de trayectoria lineal con control PID

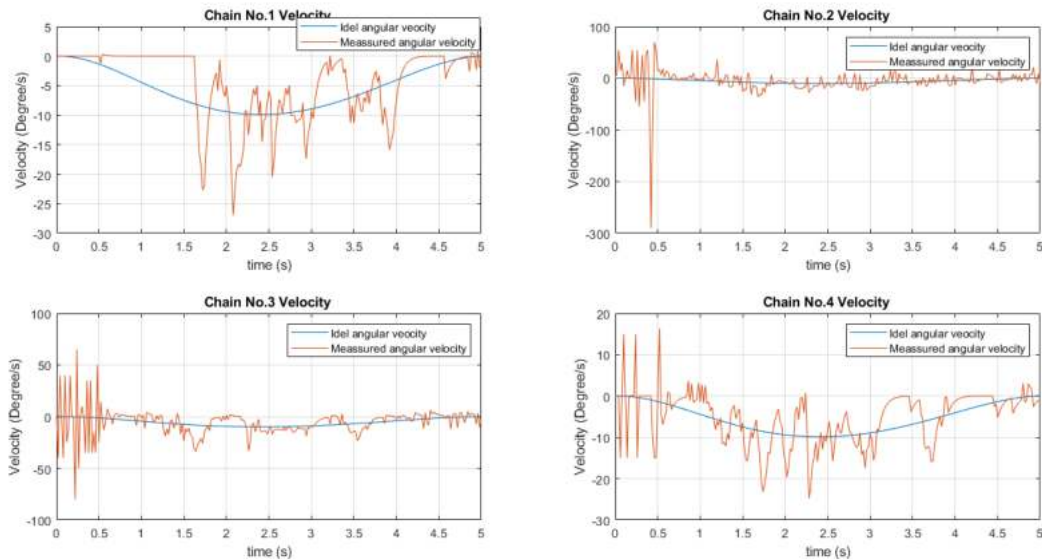


Figura 5.14: Velocidad articular de trayectoria lineal con control CTC

Se hace evidente el alto nivel de ruido en la variable en ambos esquemas de control debido a

la naturaleza de la motorización utilizada para el robot por lo que el análisis se centra más en el comportamiento que en los valores cuantificados.

Visualmente se encuentra correspondencia entre los valores de velocidad y su comportamiento ideal, alejándose del valor de velocidad nula cuando el valor de velocidad ideal modifica su magnitud y volviendo a reducirse al volver a tener una velocidad angular decreciente.

Para el caso de controlador CTC, se destaca la aparición de señales con menor número de cambios de sentido representando una señal con un menor nivel de ruido. Esta apreciación se verá reforzada por los datos de aceleraciones.

5.4.1.3. Análisis de aceleración del control PID y CTC

Para finalizar el estudio de variables obtenidas de la realimentación del sistema se obtiene el comportamiento de aceleración deseada contra aceleración obtenida para las dos estrategias de control, los resultados se muestran en las figuras 5.15 y 5.16.

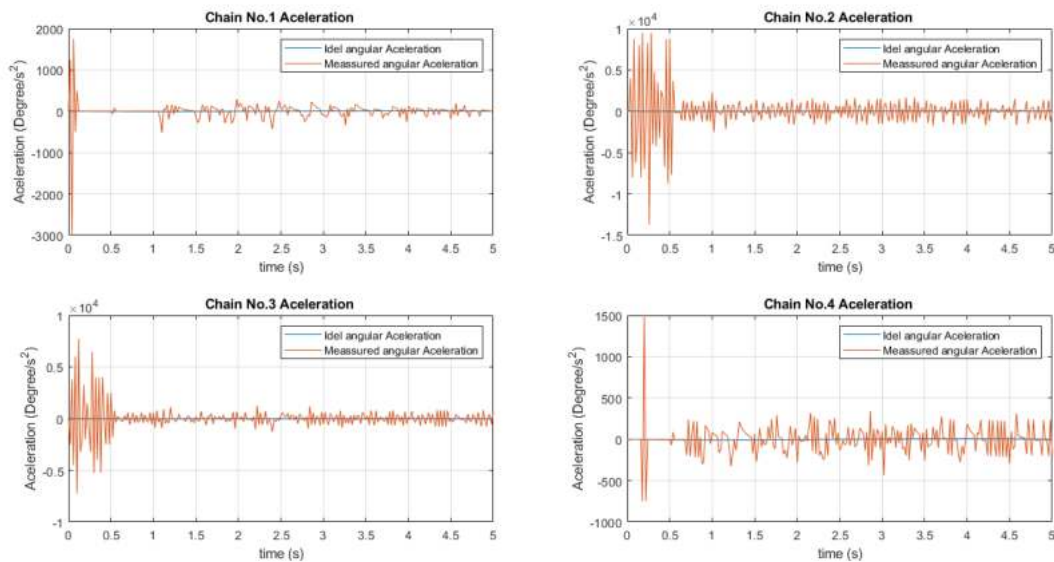


Figura 5.15: Aceleración articular de trayectoria lineal con control PID

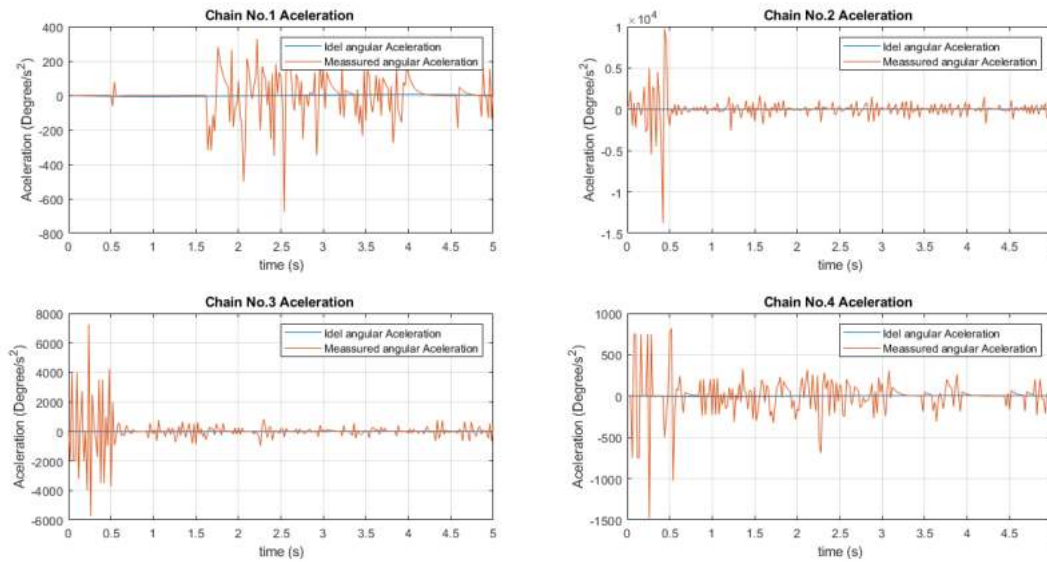


Figura 5.16: Aceleración articular de trayectoria lineal con control CTC

En este punto es difícil comparar el valor de aceleración ideal debido a la alta fluctuación de las señales, sin embargo es importante analizar el comportamiento general de los datos, obteniendo para el controlador CTC señales con menor ruido, es decir, menor variación de la señal así como valores de aceleración instantánea menores que en el seguimiento realizado haciendo uso del controlador PID.

5.4.2. Desempeño de control PID Y CTC en trayectoria triangular

Se evalúa la respuesta del sistema ante la segunda trayectoria buscando el mayor grado de correspondencia entre consigna y valor obtenido para evaluar su rendimiento bajo criterios cuantificables y visuales.

5.4.2.1. Análisis de precisión de control PID y CTC

En la figura 5.17 se observa el seguimiento de la trayectoria triangular con control PID en el espacio cartesiano mostrando el seguimiento de consigna para los requerimientos dados, al mismo tiempo que se visualiza el grado de error.

Para esta trayectoria se encontraron limitantes en el comportamiento del robot generadas por el comportamiento de los tornillos sin fin, el empuje axial presente en este componente genera complicaciones al momento de encontrar cambios de sentido en consignas sobre el plano XY, especialmente cuando la trayectoria articular deseada exige comportamientos asimétricos por parte de las cadenas cinemáticas 1 y 2 ya que estas presentan una mayor correlación en su comportamiento debido su disposición geométrica gemela.

Estrategias de mejora del prototipo se estudian más adelante, sin embargo este comportamiento no imposibilita el análisis y comparación de los controladores, por el contrario presenta una oportunidad para evaluar su robustez ante limitaciones de los componentes físicos de un sistema.

Se acompaña de la imagen 5.18 donde se plasma el error cuadrado a través del seguimiento de la consigna; el valor de error fluctúa a través de la gráfica, evidenciando los constantes esfuerzos del controlador para realizar el seguimiento de consigna y manteniéndose inferior a los 2cm.

Cuantificando dicho error medio cuadrático en todo el seguimiento de la consigna se obtiene un valor de 0.0087.

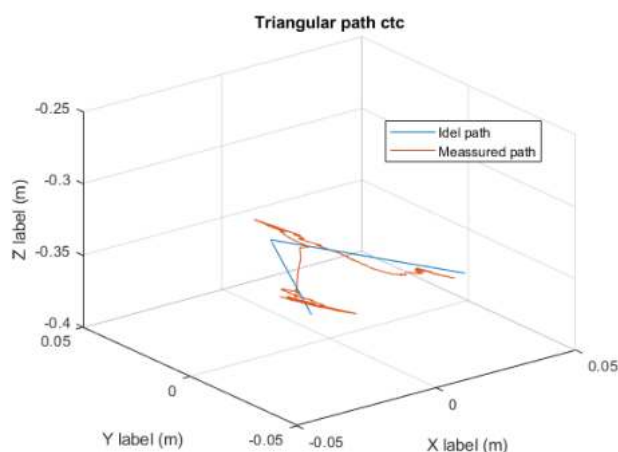


Figura 5.17: Seguimiento de trayectoria triangular con PID

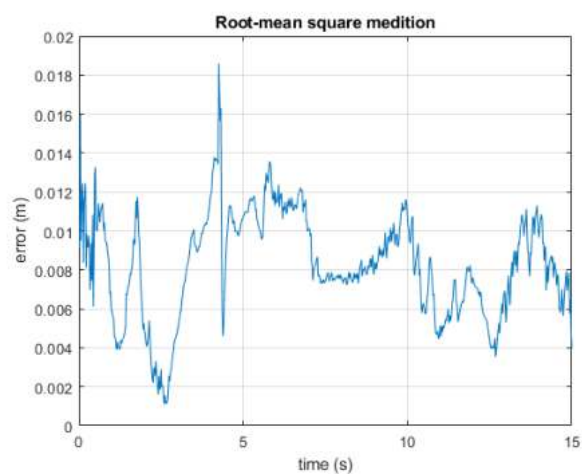


Figura 5.18: Error medio cuadrático trayectoria triangular con PID

Se muestra también el seguimiento de la consigna en términos articulares, mostrando el comportamiento de cada uno de los brazos. Dado que cada uno de los brazos obedece a una ley de control independiente y a las características únicas de cada cadena cinemática, se encuentran diferencias entre los movimientos idealmente coordinados. en este apartado se observan un comportamiento notablemente inferior en la cadena cinemática No.1, dicha cadena si bien desarrolla un trabajo de seguimiento, se encuentra limitada por los aspectos físicos anteriormente señalados, manteniéndose invariante en algunos intervalos de tiempo a pesar del esfuerzo de control, hasta que es capaz de vencer la resistencia del tornillo sin fin y en ese momento es sobre-compensando debido al alto error en ese instante de evaluación del sistema.

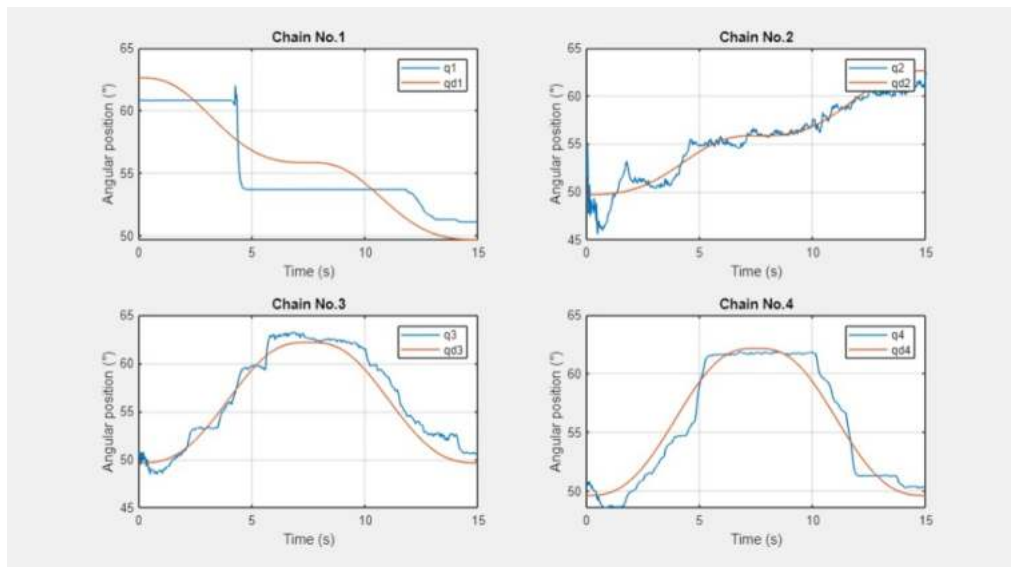


Figura 5.19: Consignas articulares deseadas vs obtenidas con CTC

En la figura 5.20 se observa el seguimiento de trayectoria triangular con control CTC en espacio cartesiano mostrando el seguimiento de consigna para los requerimientos dados a la par que se visualiza el grado de error.

A diferencia del controlador PID, el control CTC logró un mejor comportamiento desde un análisis visual en el seguimiento de la trayectoria con las mismas limitaciones del sistema con una menor presencia de zonas de inestabilidad. Referente al error cuadrado, presentó valores inferiores a 0.8cm en gran parte de la trayectoria e incrementándose hacia el final de la misma por un desfase constante en el seguimiento.

Cuantificando dicho error medio cuadrático en todo el seguimiento de la consigna se obtiene un valor de 0.0098m.

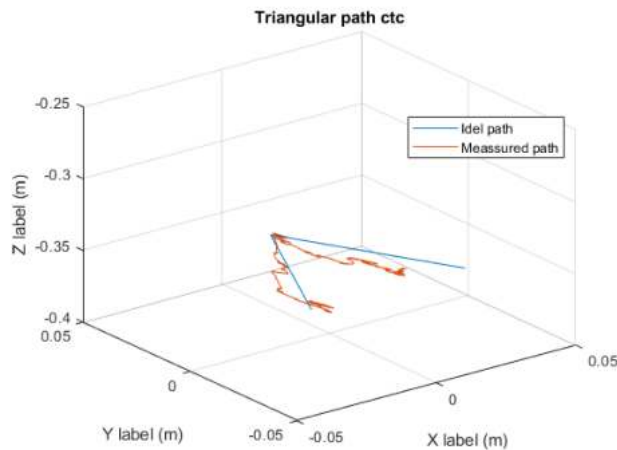


Figura 5.20: Seguimiento de trayectoria triangular con CTC

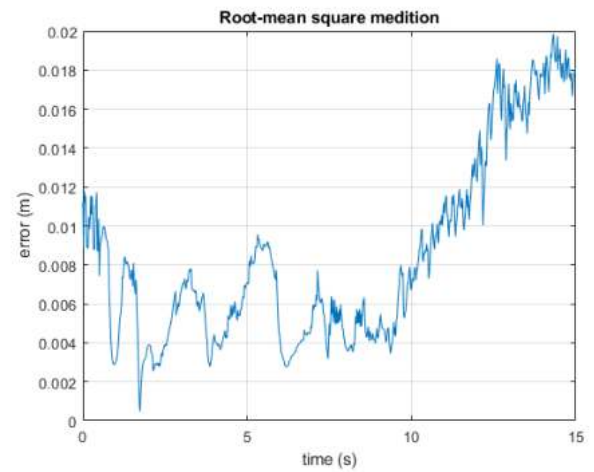


Figura 5.21: Error medio cuadrático trayectoria triangular con CTC

Se muestra también el seguimiento de la consigna en términos articulares, mostrando el comportamiento de cada uno de los brazos. A comparación del control PID se observa un mejor seguimiento en la cadena cinemática No.1, sobre-compensando menos los puntos de bloqueo del tornillo sin fin.

Es posible identificar el punto de desfase constante observado previamente en el seguimiento cartesiano, este comportamiento es debido al error de seguimiento en la cadena cinemática No.4 a partir de la mitad de la trayectoria.

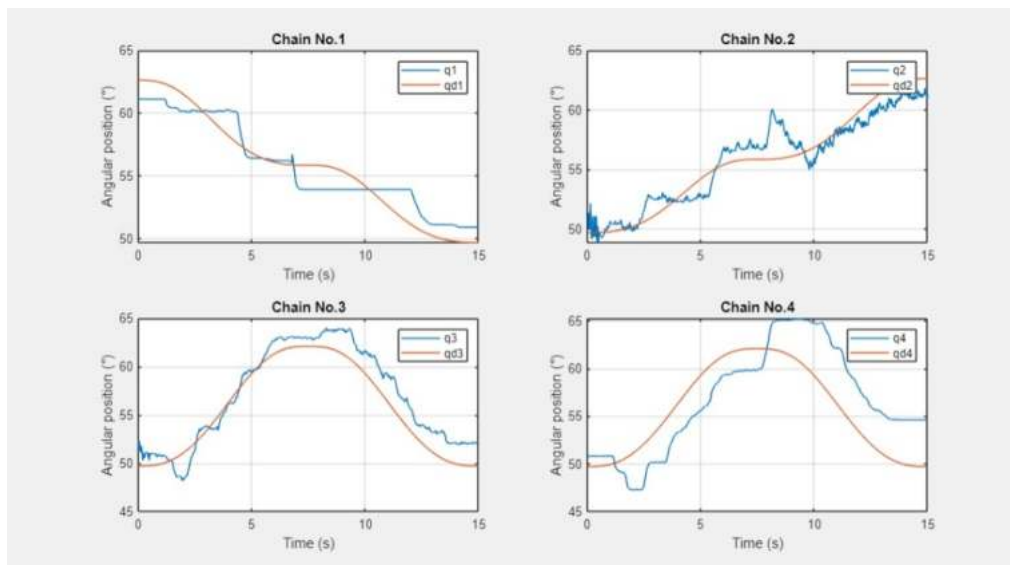


Figura 5.22: Consignas articulares deseadas vs obtenidas con CTC

5.4.2.2. Análisis de velocidad del control PID y CTC

Dando cumplimiento a los objetivos planteados se calcula el comportamiento de velocidad deseada contra velocidad obtenida para las dos estrategias de control, los resultados se muestran en las figuras 5.23 y 5.24.

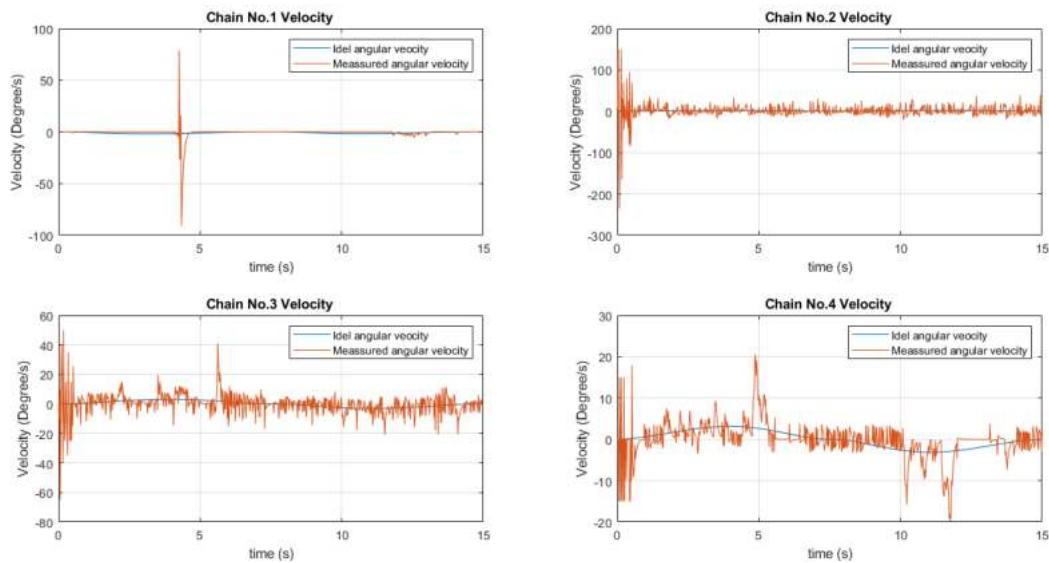


Figura 5.23: Velocidad articular de trayectoria lineal con control PID

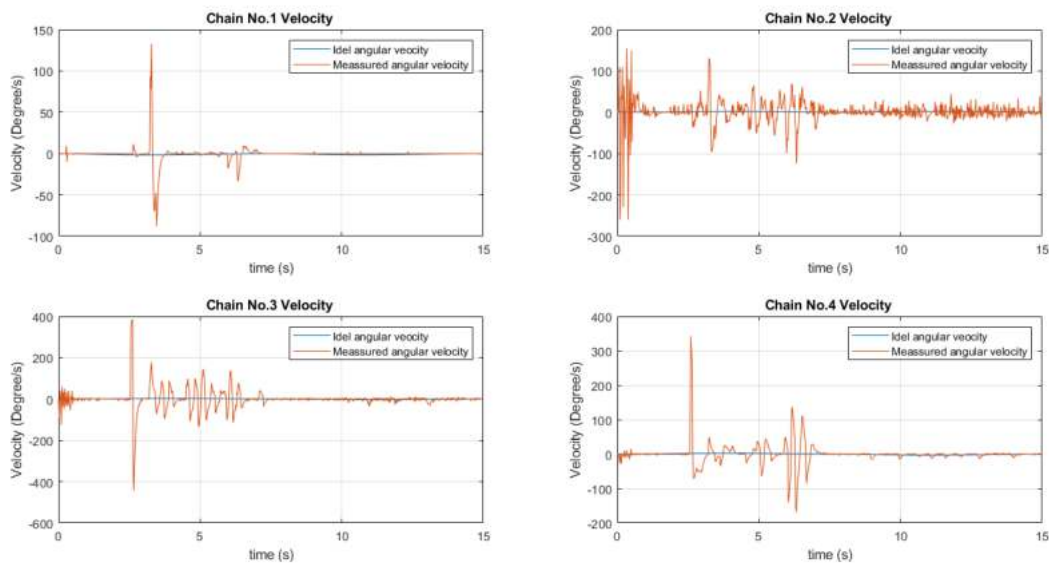


Figura 5.24: Velocidad articular de trayectoria lineal con control CTC

A pesar del alto nivel de ruido en las señales, con velocidades medidas altamente cambiantes

es posible evidenciar correlación entre los valores obtenidos y los deseados.

Para el caso de controlador CTC, se hace aún más evidente que en la disminución de ruido en la señal de velocidad medida, especialmente en las cadenas cinemáticas No. 3 y 4.

5.4.2.3. Análisis de aceleración del control PID y CTC

Para finalizar el estudio de variables obtenidas de la realimentación del sistema se obtiene el comportamiento de aceleración deseada contra aceleración obtenida para las dos estrategias de control, los resultados se muestran en las figuras 5.25 y 5.26.

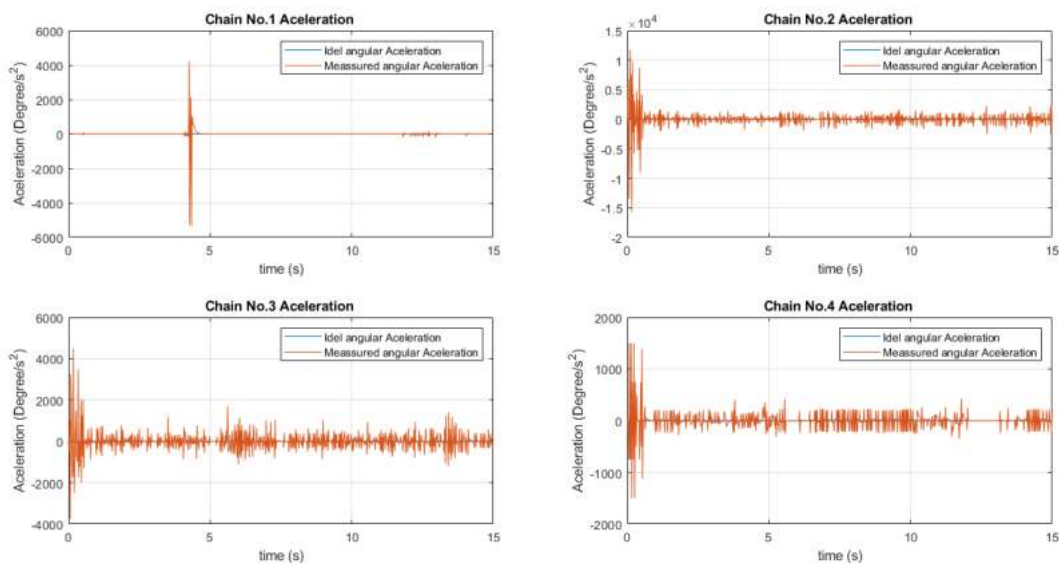


Figura 5.25: Aceleración articular de trayectoria lineal con control PID

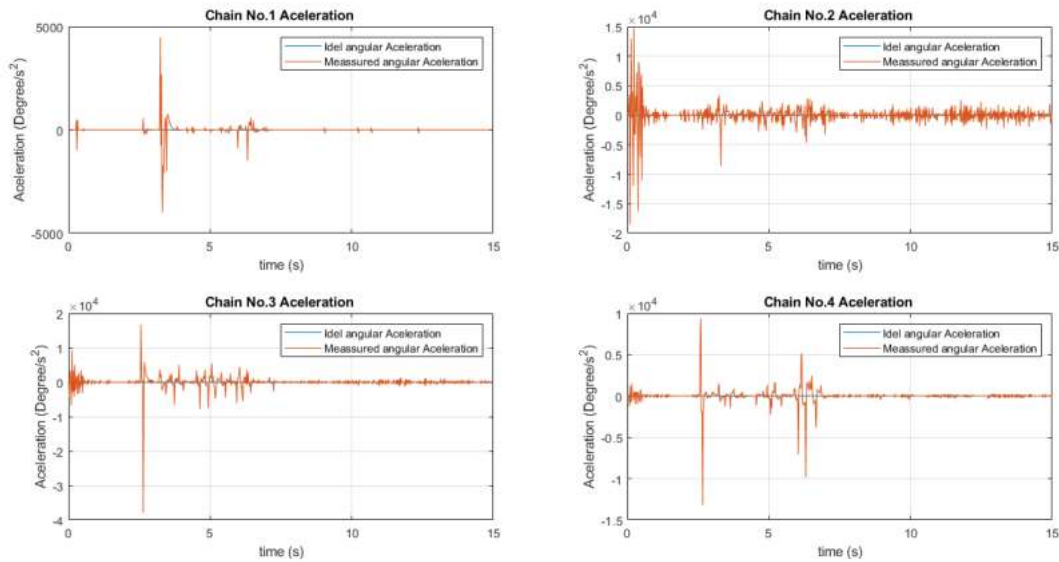


Figura 5.26: Aceleración articular de trayectoria lineal con control CTC

Nuevamente es difícil comparar la aceleración deseada debido al alto nivel de ruido de la señal medida, sin embargo se reafirma el argumento de la disminución de ruido en la señal en la estrategia de control CTC, debido a un esfuerzo de control comparativamente menos variante.

5.4.3. Desempeño de control PID Y CTC en trayectoria pick and place

Se evalúa la respuesta del sistema ante la tercera trayectoria buscando el mayor grado de correspondencia entre consigna y valor obtenido para evaluar su rendimiento bajo criterios visuales y cuantificados.

5.4.3.1. Análisis de precisión de control PID y CTC

En la figura 5.27 se observa el seguimiento de trayectoria pick and place con control PID en espacio cartesiano mostrando el seguimiento de la consigna para los requerimientos dados. Dividiendo la trayectoria en los tres segmentos que la componen se observa una alta precisión en el seguimiento de la primera sección, posteriormente durante el desplazamiento sobre el plano XY se observan desfases menores a 1cm y hacia el segmento final, al encontrar el cambio de sentido se evidencia nuevamente la incidencia del movimiento axial no deseado del mecanismo tornillo sin fin - corona.

Se acompaña de la imagen 5.8 donde se visualiza el error cuadrático, en este aumenta considerablemente alrededor de los 10 a 15 segundos, reafirmando la pérdida de precisión en la última

sección de la trayectoria. Calculando el error medio cuadrático de la trayectoria se obtuvo un valor de 0.0097 m.

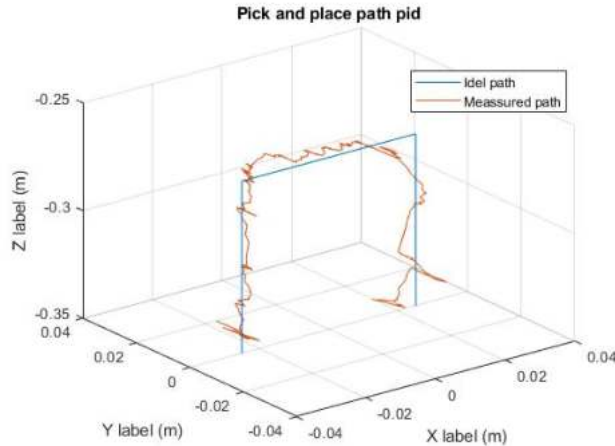


Figura 5.27: Seguimiento de trayectoria pick and place con PID

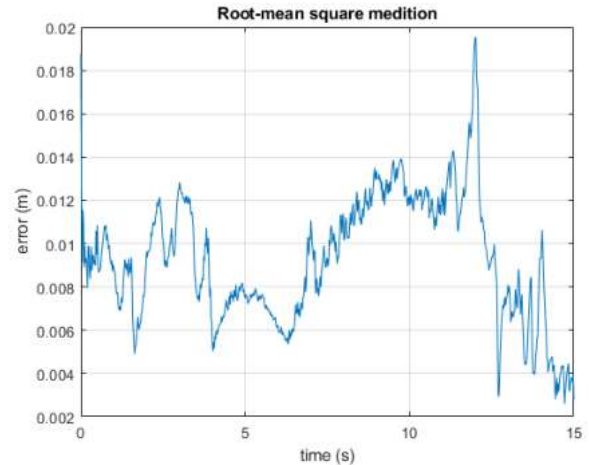


Figura 5.28: Error medio cuadrático trayectoria pick and place con PID

En la imagen 5.29 se muestra el seguimiento de la consigna pick and place en términos articulares, donde se puede evidenciar de manera clara, los movimientos en los ejes de cada cadena cinemática del robot y asociando la pérdida de precisión del sistema principalmente en el brazo No.3 que en este segmento final presentó comportamientos no deseados, invariante en algunos momentos y sobre compensando en otros.

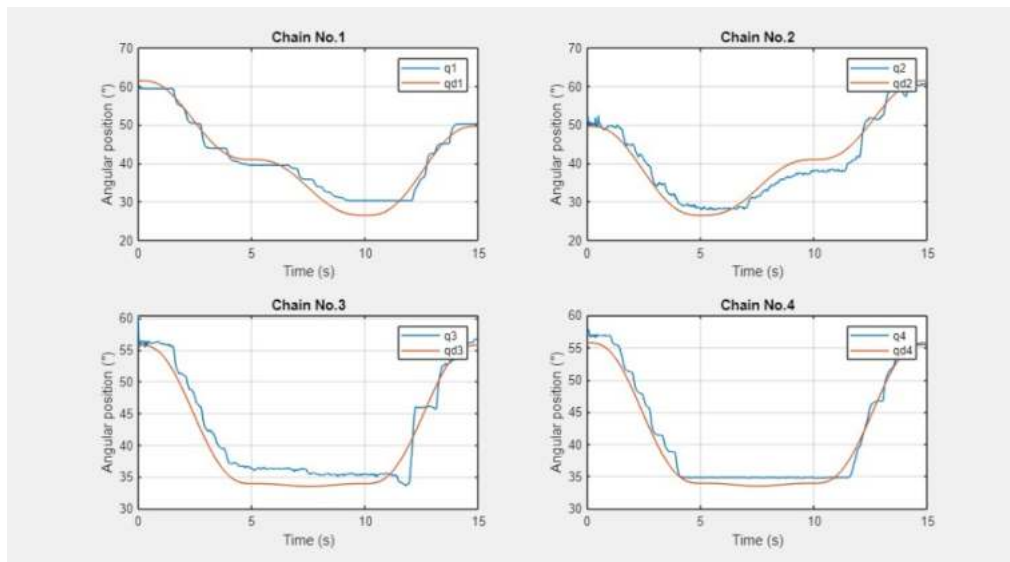


Figura 5.29: Consignas articulares deseadas vs obtenidas con PID

Una vez realizada la trayectoria pick and place con el control PID, se realizó el seguimiento

de esta misma trayectoria usando el control CTC. En la imagen 5.30 se muestra trayectoria realizada por el robot en rojo y la trayectoria deseada en azul, dando resultados similares al uso de un control PID; una mayor precisión en los dos segmentos iniciales y una pérdida en el descenso final.

El error cuadrático que se obtuvo al utilizar el control CTC se puede observar en la figura 5.31, presentando un incremento los mismos puntos del control PID. Cuantificando el error cuadrático medio, se obtiene que este presenta un error de 0.0128m un poco mayor al PID, se recalca que las estimaciones de posición cartesiana a través del modelo dinámico no son las más precisas.

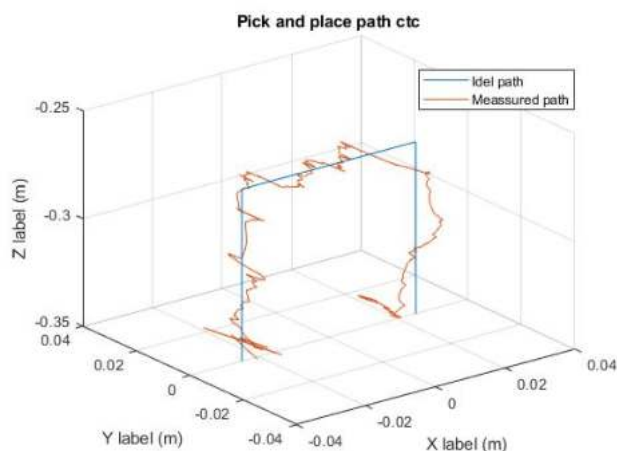


Figura 5.30: Seguimiento de trayectoria pick and place con CTC

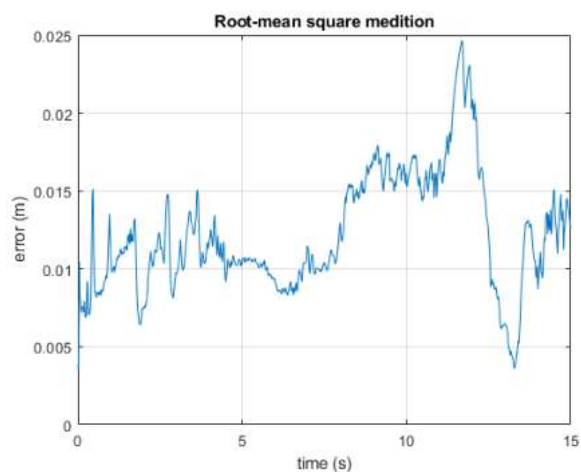


Figura 5.31: Error medio cuadrático trayectoria pick and place con CTC

De igual forma se presentan también los resultados obtenidos de las posiciones articulares tomadas en la consigna de pick and place con el control CTC, mostrando un desempeño similar al PID, buen comportamiento general pero pérdida de precisión en el brazo No.3, aunque con ligeras variaciones como unamejor corrección del error hacia el punto final de la trayectoria (ver figura 5.32). A diferencia del comportamiento en otras consignas como la triangular en el movimiento articular del robot, el seguimiento de la consigna pick and place no presenta grandes inconvenientes debido a los pocos cambios de dirección articular presente en esta trayectoria.

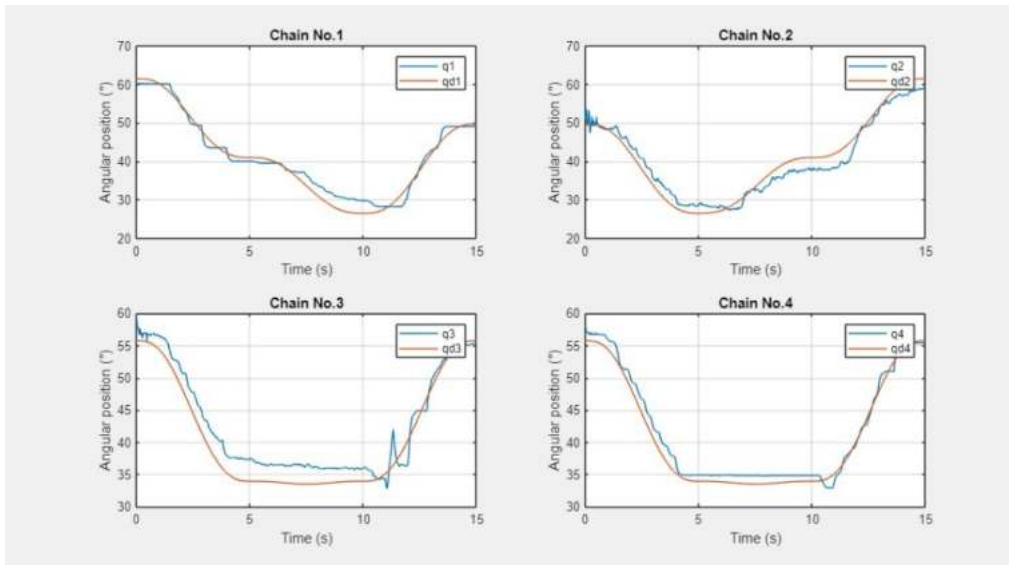


Figura 5.32: Consignas articulares deseadas vs obtenidas con CTC

5.4.3.2. Análisis de velocidad del control PID y CTC

Dando cumplimiento a los objetivos planteados se calcula el comportamiento de velocidad deseada contra velocidad obtenida para las dos estrategias de control, los resultados se muestran en las figuras 5.33 y 5.34.

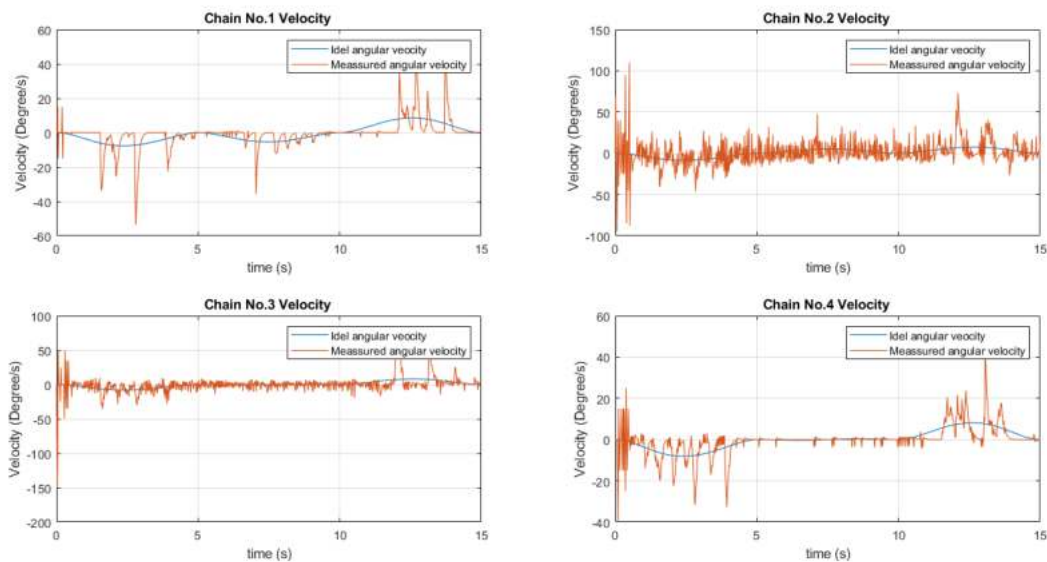


Figura 5.33: Velocidad articular de trayectoria pick and place con control PID

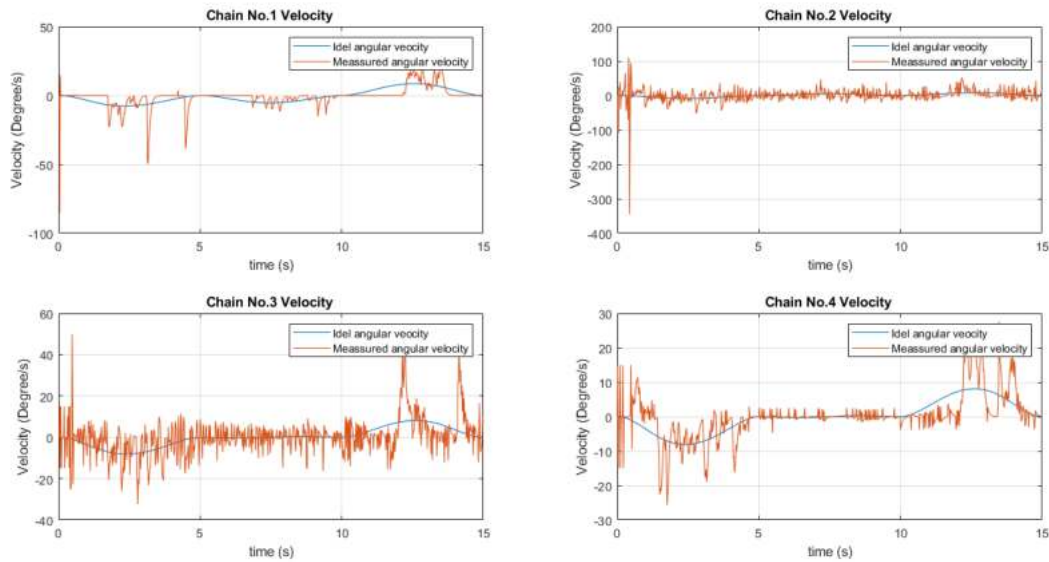


Figura 5.34: Velocidad articular de trayectoria pick and place con control CTC

Como se puede observar en las figuras anteriores, a pesar del ruido provocado por el esfuerzo de control y la estimación de la velocidad, las dos estrategias de control intentan realizar un seguimiento de la velocidad deseada, incrementando la magnitud de los valores de velocidad medida en los puntos en que la velocidad ideal se aleja del valor nulo. A nivel comparativo, el control CTC realiza un seguimiento más cercano y una reducción de ruido principalmente en las cadenas 1, 3 y 4.

5.4.3.3. Análisis de aceleración del control PID y CTC

Al igual que en las anteriores trayectorias es difícil hacer un análisis y comparación de aceleraciones en los controles CTC y PID aplicados al prototipo, esto se debe al alto nivel de ruido de la señal medida como se muestra en las figuras 5.35 y 5.36, sin embargo se observó que el control CTC presentó menor ruido en las aceleraciones articulares en comparación del control PID, este comportamiento se pudo evidenciar en las tres trayectorias aplicadas al robot.

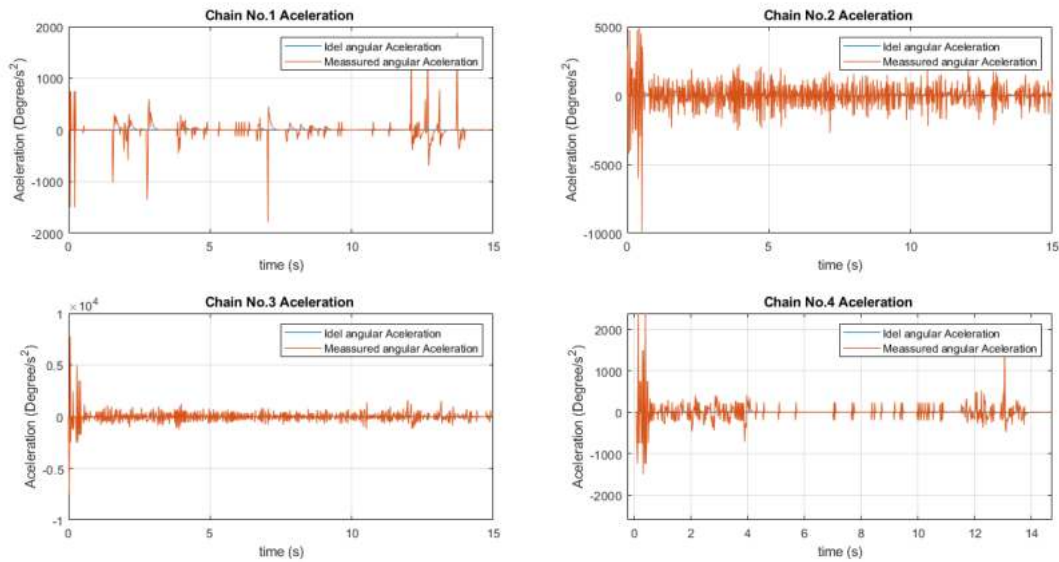


Figura 5.35: Aceleración articular de trayectoria pick and place con control PID

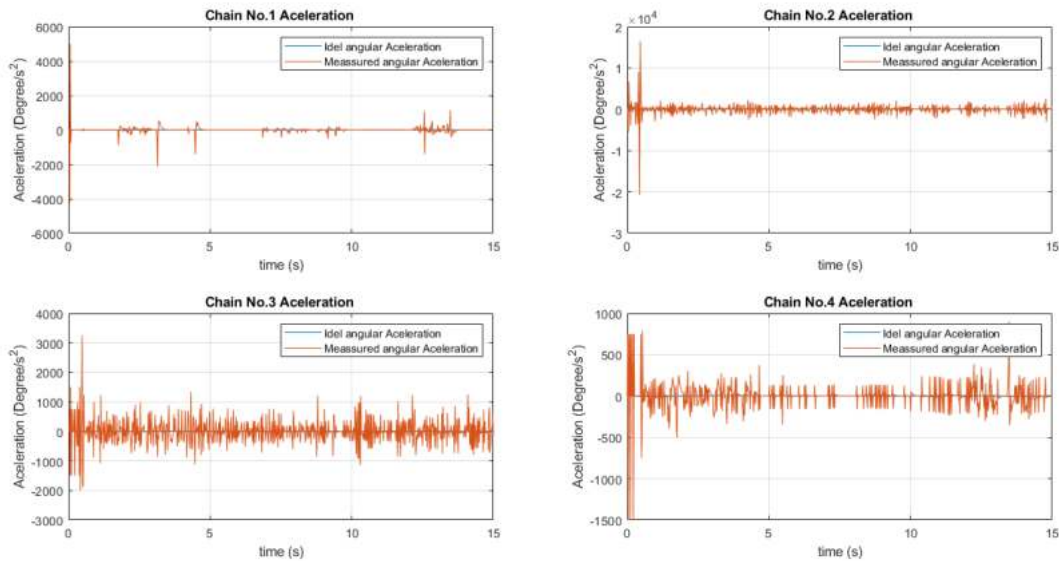


Figura 5.36: Aceleración articular de trayectoria pick and place con control CTC

Con esto, se concluye con el trabajo planteado para el cumplimiento del objetivo específico No.2: "Evaluar el desempeño de las estrategias de control PID y CTC aplicado al robot H4 paralelo para el seguimiento de una trayectoria de pick-and-place considerando precisión, velocidad y aceleración".

5.5. Análisis de robustez de las estrategias de control PID y CTC

De acuerdo con el tercer objetivo específico planteado para esta investigación se busca determinar la robustez de las estrategias de control a través de variaciones nominales de los parámetros involucrados en el sistema, para ello se abordarán modificaciones en diferentes valores tanto internos como externos, para efectos de esta investigación, la robustez se define como la capacidad de la estrategia de control para cumplir con las especificaciones a pesar de la incertidumbre.

Dicho análisis se separa en dos segmentos: Análisis interpretativo de los comportamientos observados para los dos controladores a lo largo de su implementación y análisis cuantitativo a partir de variaciones específicos de parámetros comparables entre las dos estrategias.

5.5.1. Análisis interpretativo

Aún antes de la implementación de los controladores se introducen parámetros que inciden en el comportamiento del controlador CTC, es el caso de los parámetros geométricos y dinámicos, en este apartado, si bien la mayoría de parámetros geométricos, al igual que las masas son conocidos y calculados con precisión, no existe garantía de que la estimación proporcional realizada para valores de inercia correspondan a los valores reales del sistema. En muchos controladores, la carga de parámetros estimados supondría un punto de falla crítico, sin embargo, el controlador CTC demuestra una muy buena adaptabilidad, siendo capaz de controlar el prototipo aún con estas consideraciones.

También, a lo largo de la implementación de los controladores y de las pruebas llevadas a cabo con ellos, se introdujo constantemente variaciones de condiciones. Durante la variación de ganancias para el proceso de sintonización del controlador PID se observa una correspondencia proporcional del incremento del esfuerzo de control a medida que se incrementan las ganancias; tal como lo describe la teoría clásica de control, progresivamente el control va ganando energía hasta el punto óptimo y a partir de allí cae en generar inestabilidades al sistema.

Por otra parte el controlador CTC al conocer el comportamiento del sistema se adapta mejor al mismo por lo que cuenta con una mayor facilidad de sintonización, menor probabilidad de generar comportamientos inestables mejor adaptabilidad ante cambios de trayectoria o de condiciones; en conjunto, una mayor robustez ante los parámetros involucrados a través de todo el proceso de implementación y pruebas.

5.5.2. Análisis cuantitativo

Para corroborar y argumentar los análisis desarrollados de forma interpretativa, así como para profundizar en el estudio de la robustez de los sistemas de control, se realizan estudios cuantitativos que permitan conocer el grado de robustez de las estrategias de control.

Buscando garantizar una correspondencia entre los resultados, se realizó estudios en el cambio de la respuesta del prototipo modificando la masa depositada en el órgano terminal; dicha variación es de especial interés para un uso práctico de un robot de este tipo al demostrar su adaptabilidad ante diferentes cargas útiles u órganos terminales.

Para la prueba sobre la robustez de cada uno de los controladores, se somete el sistema a un cambio de masa de 100g dispuesto como peso muerto en el extremo final de la góndola y fijado a través del órgano terminal del robot representando un 15 % de la variación en el peso total del robot. El montaje físico realizado se puede observar a continuación:



Figura 5.37: Disposición de la masa adicional

Con el cambio de masa, se ejecutó la trayectoria de *pick and place* haciendo uso de los dos controladores estudiados, siendo dicha trayectoria la más completa y la que más claramente emula necesidades que debería satisfacer el robot en un escenario de trabajo como manipulador industrial.

Para el controlador PID se presentan los resultados en términos de seguimiento de consignas articulares, seguimiento de consignas cartesianas, error medio cuadrático, velocidades y aceleraciones a través de las imágenes mostradas a continuación.

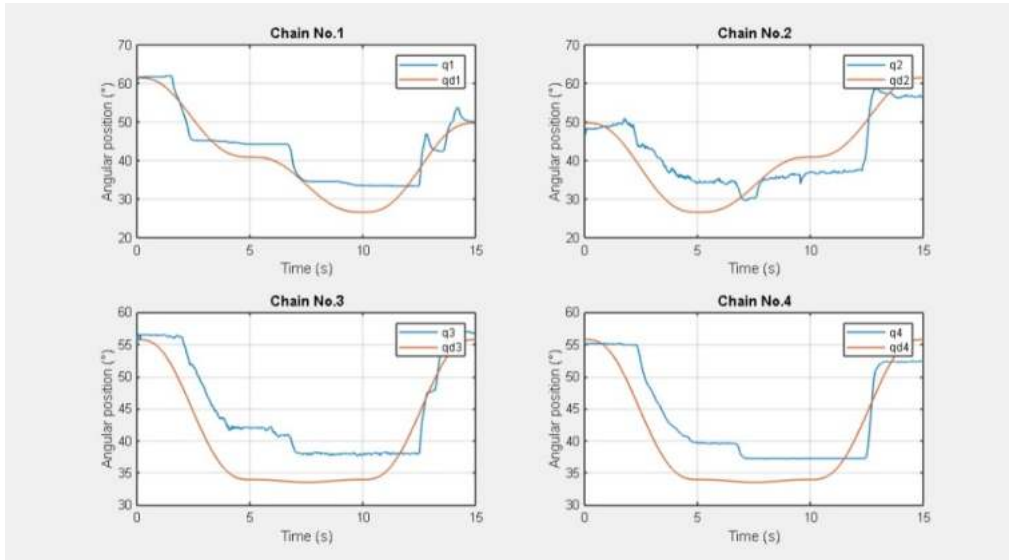


Figura 5.38: Seguimiento articular para sistema con control PID y masa

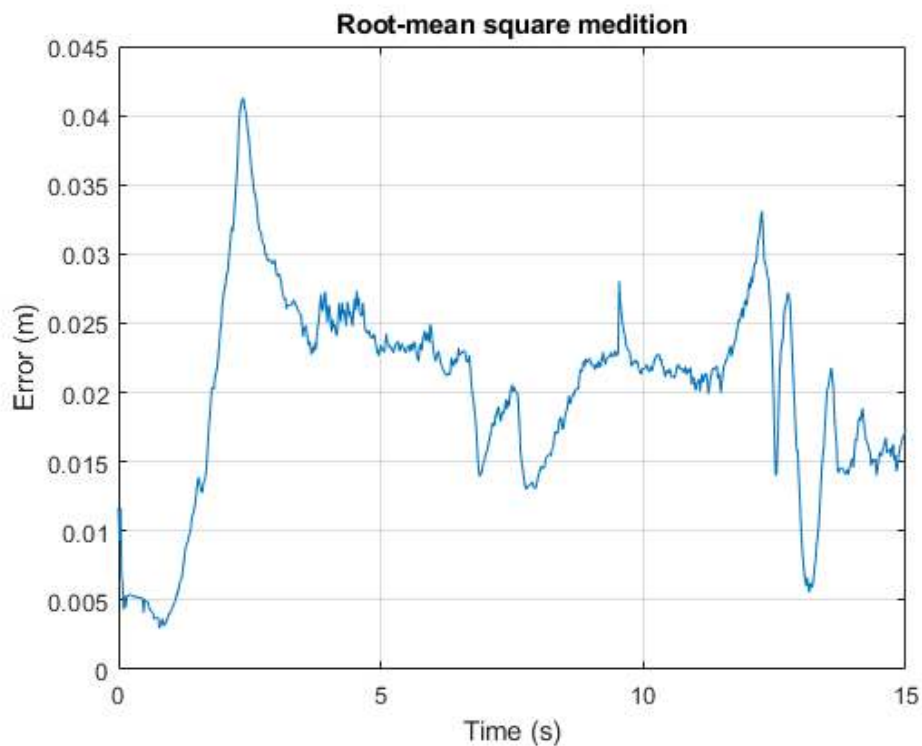


Figura 5.39: Error medio para sistema con control PID y masa

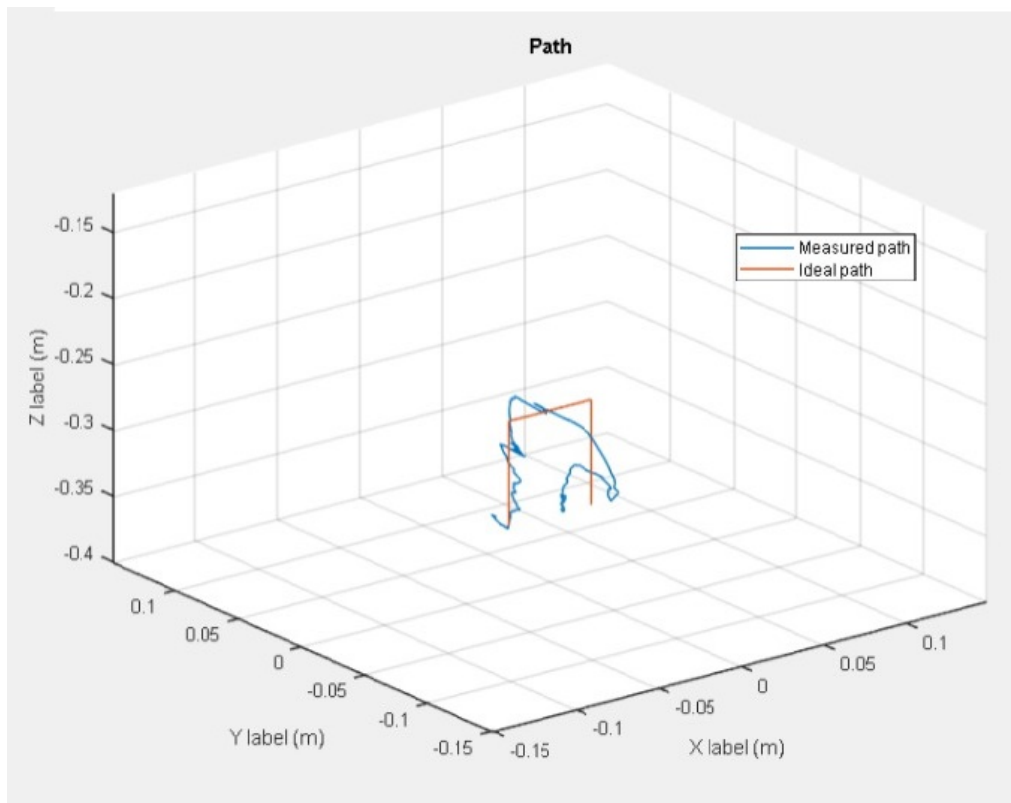


Figura 5.40: Seguimiento cartesiano para sistema con control PID y masa

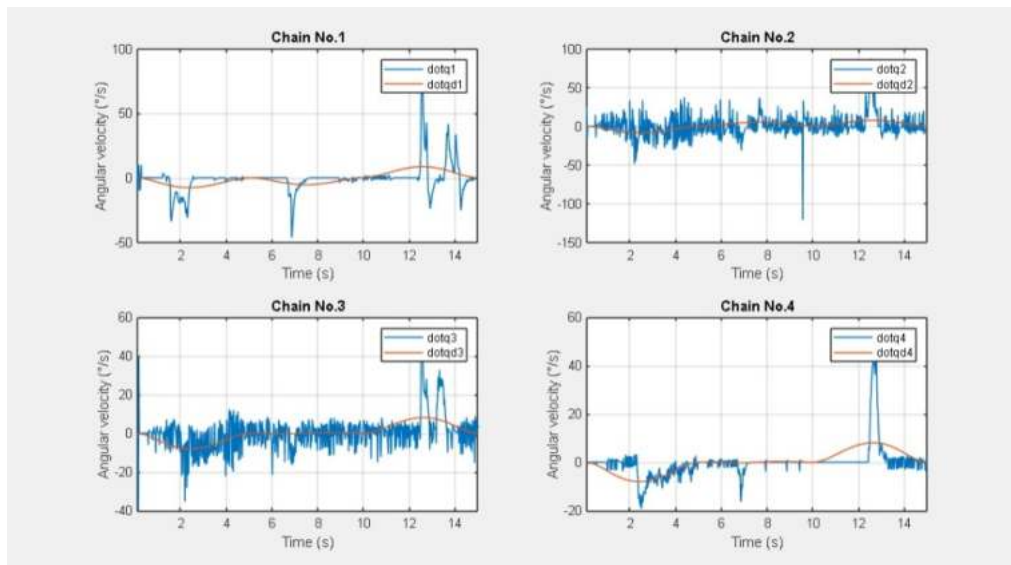


Figura 5.41: Seguimiento en velocidad para sistema con control PID y masa

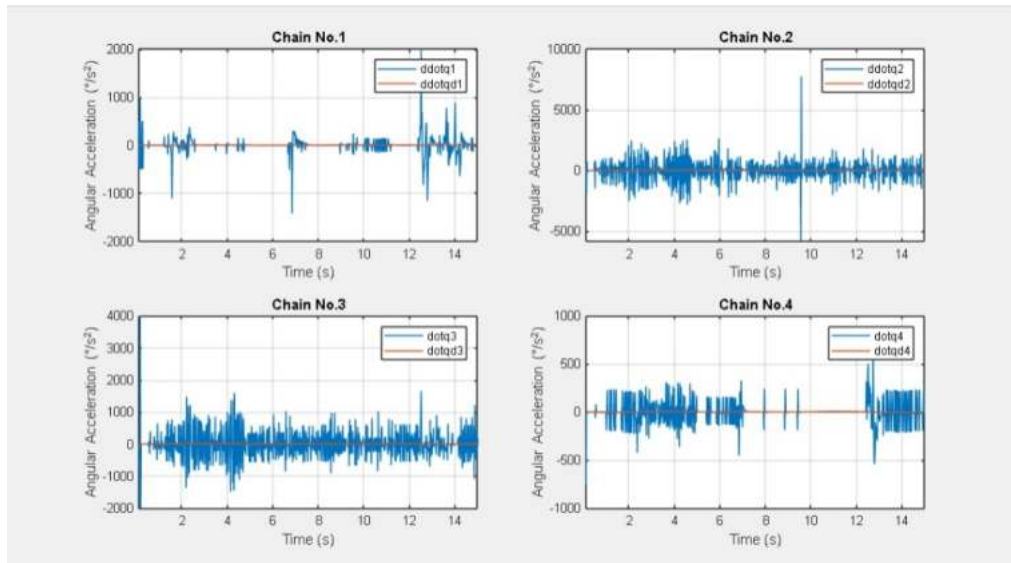


Figura 5.42: Seguimiento en aceleración para sistema con control PID y Masa

Con base a los datos obtenidos, se puede observar como el sistema de control PID intenta mantener el seguimiento de consigna, sin embargo no logra obtener los mismos valores de seguimiento que en las pruebas sin masa, a través de la gráfica de seguimiento articular se puede analizar el comportamiento que tuvo lugar: Los brazos 3 y 4 no logran realizar el seguimiento de consigna con el esfuerzo de control que genera el lazo PID, ascienden angularmente conforme la consigna recorre el tramo inicial de la trayectoria pero sin alcanzar el punto deseado, se mantienen lateralizando sobre el segundo tramo y sobre la sección final descienden violentamente, influenciados fuertemente por el cambio de peso en el sistema. Simultáneamente los brazos 1 y 2 logran mantener un mejor seguimiento al no recibir de forma directa el peso por su disposición geométrica, sin embargo se acaban viendo limitados por la estructura del robot ante la posición angular de los brazos 3 y 4.

La gráfica de seguimiento en términos cartesianos, la gráfica de error cuadrado y el valor de error medio cuadrado ubicado en 0.0214m consolidan tanto a nivel visual como cuantitativo los errores de seguimiento obtenidos durante la prueba, a pesar de la sintonización realizada previamente, el sistema presenta una notable diferencia en el comportamiento obtenido.

Las gráficas de seguimiento de velocidad y aceleración, reafirman las observaciones previas, se confirma la intención de seguimiento en las zonas en las que hay variación de consigna así como la presencia de altas velocidades y aceleraciones en los tramos correspondientes a la tercer sección de la trayectoria, principalmente para los brazos 3 y 4.

Finalmente se incluyen los resultados en términos de seguimiento de consignas articulares, seguimiento de consignas cartesianas, error medio cuadrático, velocidades y aceleraciones para las pruebas de robustez bajo el algoritmo de control CTC:

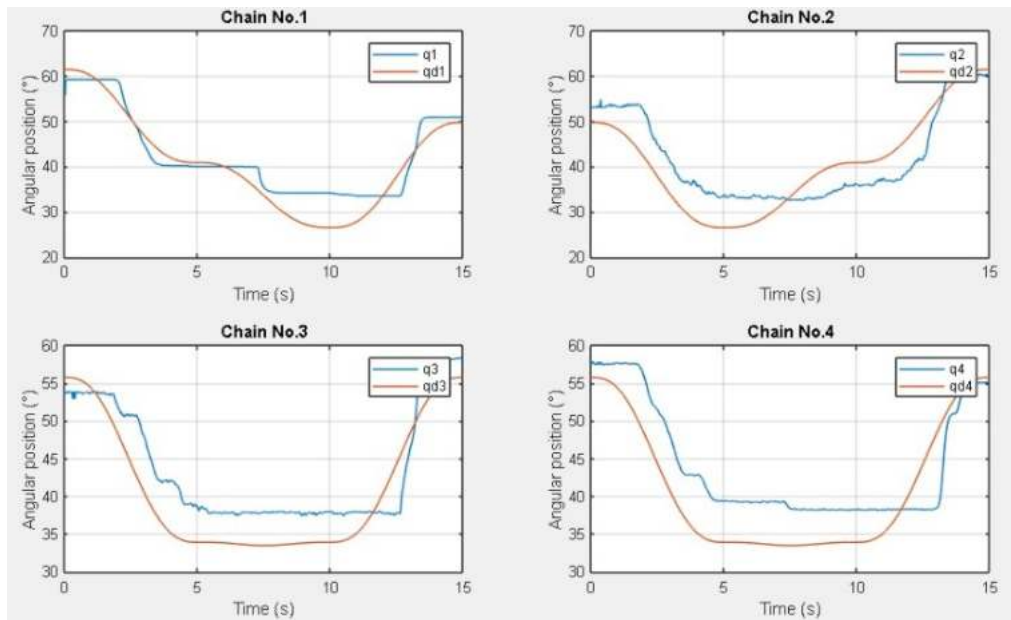


Figura 5.43: Seguimiento articular para sistema con control CTC y masa

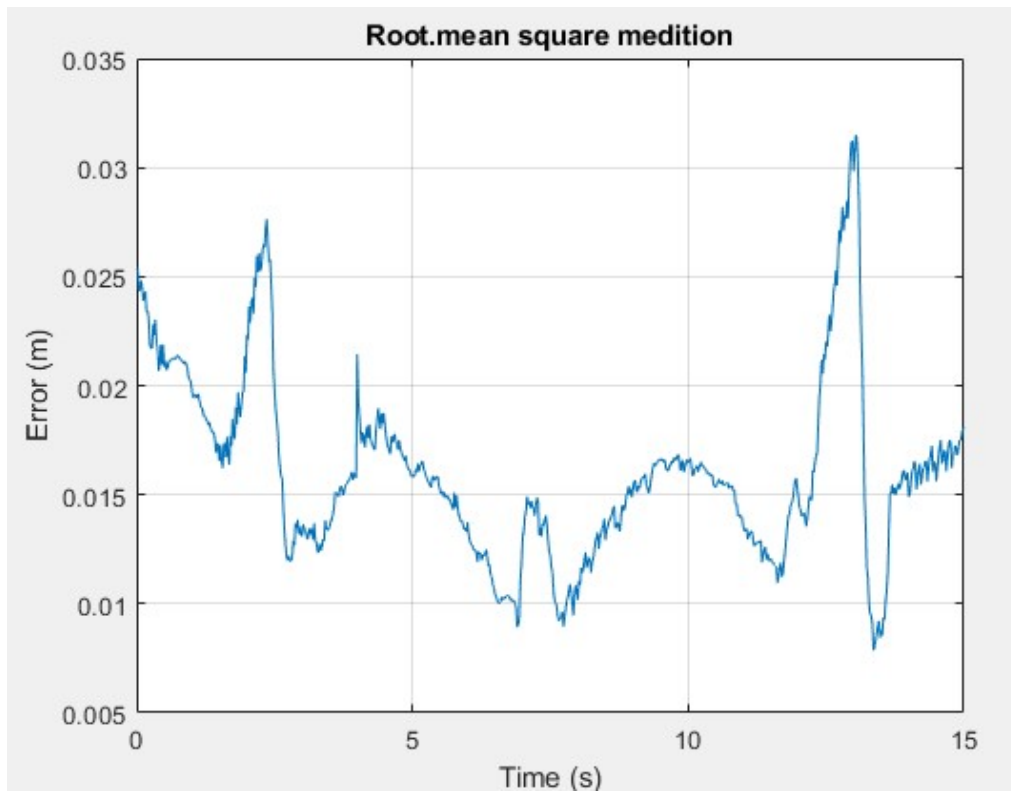


Figura 5.44: Error medio para sistema con control CTC y masa

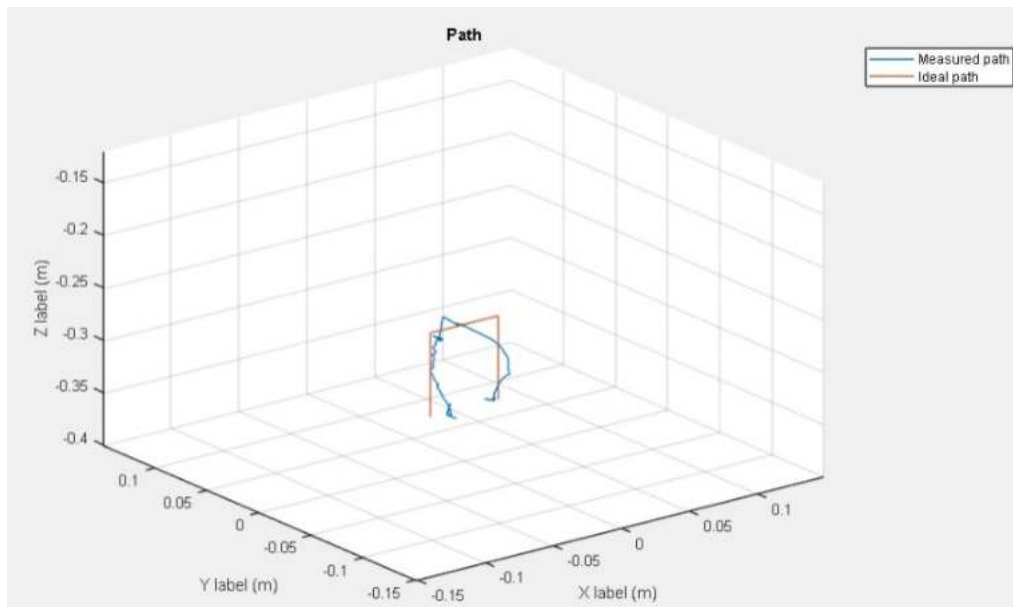


Figura 5.45: Seguimiento cartesiano para sistema con control CTC y masa

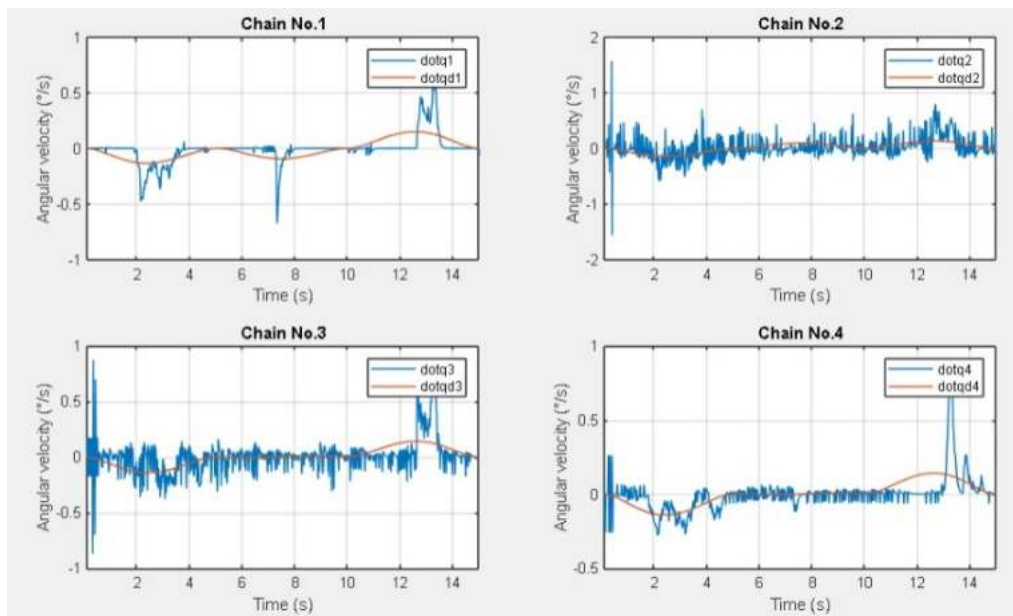


Figura 5.46: Seguimiento en velocidad para sistema con control CTC y masa

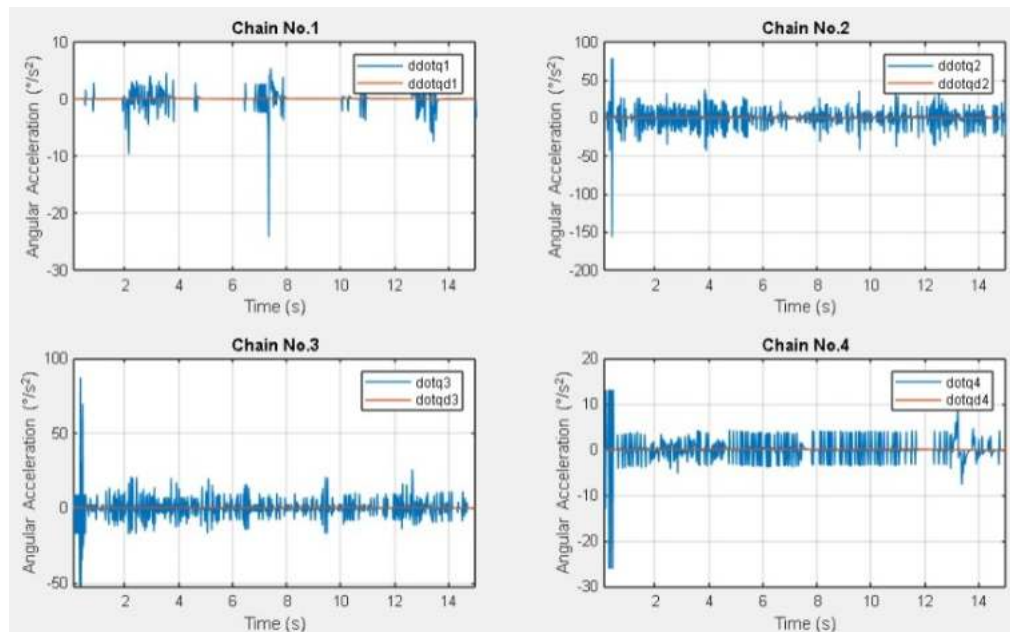


Figura 5.47: Seguimiento en aceleración para sistema con control CTC y Masa

Los resultados obtenidos retratan nuevamente la incidencia del peso en el órgano terminal del sistema, se observa el incremento de dificultad para realizar el seguimiento de consigna, sin embargo existen diferencias claras en todas las gráficas estudiadas.

En la gráfica de seguimiento en términos articulares se evidencia una clara mejora en el comportamiento general, Los brazos 1 y 2 ya presentan un mejor desempeño, sin embargo es especialmente en los brazos 3 y 4 donde el grado de cercanía con la trayectoria dada es mayor, logrando elevar la estructura del robot y la masa hasta una diferencia de aproximadamente 5° , contra el error al rededor de 10° del control PID. En la tercera sección del movimiento, donde se requiere un descenso sobre el eje Z también presenta una respuesta reactiva por la acción de la gravedad pero logrando detenerse en torno al punto objetivo sin presentar inestabilidad.

Los gráficos de seguimiento en términos cartesiano y de error medio, así como el valor de error medio cuadrático obtenido de 0.0166 para el control CTC demuestran la diferencia favorable sobre el control PID, si bien nuevamente no se obtiene el mismo nivel de seguimiento que se puede observar en la ejecución sin masa, se puede observar con claridad la confirmación de mejor comportamiento en correspondencia entre consigna y medición, cuantificándose esta diferencia a través de 0.0048m de diferencia en error medio cuadrado.

Finalmente las gráficas de velocidad y aceleración obtenidas se usan para reafirmar el comportamiento observado, especialmente hacia el final de la ejecución, donde el sistema presenta un comportamiento más estable y controlado comparándolo contra la estrategia de control PID.

Con esto, se concluye con el trabajo planteado para el cumplimiento del objetivo específico No.3: "Determinar la robustez de las estrategias de control PID y CTC aplicando variaciones en los valores nominales de los parámetros involucrados en el sistema."

CAPÍTULO 6

CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

Contenido del capítulo

6.1. Conclusiones	143
6.1.1. Requisitos para la implementación	143
6.1.2. Diferencias de comportamiento en condiciones normales	143
6.1.3. Diferencias de comportamiento ante perturbaciones e incertidumbre	143
6.2. Trabajos futuros	144

En el último capítulo se da cierre al trabajo de investigación titulado "Comparación de controladores PID y CTC aplicados a un robot paralelo" respondiendo la pregunta de investigación planteada: "¿Cuál es la incidencia de la elección de las estrategias de control PID y CTC en el desempeño de un robot H4 al momento de realizar operaciones de *pick-and-place*?".

6.1. Conclusiones

Durante el desarrollo del documento se presentó una propuesta de prototipo de robot H4 sobre la que se implementó y evaluó en términos de posición, velocidad, aceleración y robustez dos estrategias de control diferentes: Control PID y CTC.

Las distintas estrategias de control comparten finalidad pero se diferencian en distintas características que influyen en el comportamiento final del sistema bajo cada ley de control. Para el caso de esta investigación, se observaron principalmente las siguientes diferencias entre las dos estrategias de control:

6.1.1. Requisitos para la implementación

El controlador CTC presentó un mayor número de requisitos para la implementación. Durante la fase de preparación la estrategia de control PID necesitó disponer de la planta, los sensores, los actuadores, las conexiones, las comunicaciones, los elementos de control a utilizar y el modelo geométrico del robot para integrar los lazos de control. Por otra parte, el algoritmo de control CTC presentó de forma adicional a los requisitos anteriores la necesidad de obtener el modelo dinámico del robot para estimar el comportamiento de sus estados.

6.1.2. Diferencias de comportamiento en condiciones normales

Observando los comportamientos en velocidad y aceleración ideales vs. obtenidas el controlador CTC presentó menor nivel de ruido en las señales. Se tuvo comportamientos similares en términos de seguimiento de consigna para posición articular y cartesiana así como valores de error medio cuadrático similares, sin embargo, profundizando el análisis se encontró diferencias en las velocidades y aceleraciones usadas para la ejecución con la estrategia CTC, traducándose en menores cambios repentinos de esfuerzo e incidiendo positivamente aspectos como vibraciones, desgaste a largo plazo, entre otros.

6.1.3. Diferencias de comportamiento ante perturbaciones e incertidumbre

Tanto a través del análisis interpretativo de toda la implementación de las estrategias de control como en el análisis durante las pruebas de robustez ante cambios de masa, se observó una mayor capacidad del control CTC para cumplir con las especificaciones a pesar de la incertidumbre.

La incidencia de variaciones en parámetros sobre el comportamiento del sistema fue menor, siendo una característica altamente beneficiosa ante procesos de producción flexibles, con cambios en la tarea a realizar, presencia de disturbios externos o cambios en los parámetros dinámicos del robot.

Por lo anteriormente expuesto, la incidencia de la elección de una estrategia de control PID sobre una estrategia de control CTC implica una mayor simplicidad en términos de implementación y sintonización del controlador en sus etapas iniciales, motivo por el cual a pesar de surgimiento de estrategias de control modernas sigue estando vigente en gran parte del sector industrial, sin embargo, la mejor respuesta en términos de velocidad, aceleración y robustez por parte de la estrategia de control CTC, y sus beneficios en términos de adaptabilidad, durabilidad y otros, hacen que bajo el criterio de esta investigación sean mayores los beneficios a mediano y largo plazo que el incremento de complejidad agregada por el cálculo del modelo dinámico usado en el control CTC.

6.2. Trabajos futuros

Contextualizando la presente investigación dentro del marco de la robótica paralela y en particular, de esta temática en la Universidad del Cauca, durante el desarrollo de la investigación se identificaron distintos estudios que a futuro pueden aportar a la continuación de la línea de investigación, así como temáticas que por el alcance del proyecto no fueron abordadas con total profundidad. De igual manera, se señalan desarrollos específicos para apoyar y mejorar el trabajo realizado. Entre los diferentes trabajos a futuro propuestos se encuentran:

- Profundizar los análisis en torno al modelo dinámico de robots de estructura paralela: los métodos para su obtención, la precisión en estimación de las condiciones del robot, la incidencia de parámetros internos del modelo como masas e inercias en el comportamiento del modelo, etc.
- Estudios relativos al modelo geométrico de robots de estructura paralela, considerando variaciones en disposición de las cadenas cinemáticas así como de la configuración de la góndola con las posibles aplicaciones particulares de las diferentes configuraciones geométricas.
- Estudio exhaustivo del espacio de trabajo de los robots paralelos y la incidencia de este parámetro en la planificación de las características del robot y la planeación de trayectorias .
- Desarrollo de una segunda versión del prototipo planteado, buscando mejorar especialmente los sensores y actuadores del sistema en búsqueda de mejorar el comportamiento del prototipo e incrementar sus capacidades para futuras investigaciones.

Referente a los sensores, se postula la inclusión de sistemas de medición con mayor precisión en términos articulares, sistemas de medición cartesianos absolutos como sistemas de visión máquina y/o de medición inercial tipo acelerómetro/giroscopio.

En torno a los actuadores, se considera importante la mejora en términos de torque y

de reducción de comportamientos no deseados como el empuje axial generado por los tornillos sin fin.

- Actualización de los elementos de control, considerando el uso de tarjetas dedicadas en términos de adquisición de datos, procesamiento de los lazos de control y/o transmisión del esfuerzo de control buscando maximizar la eficacia de los sistemas de control en aspectos como reducción de tiempos de respuesta del sistema.
- Generación de modelos digitales a partir del modelo 3D disponible del robot, aprovechando la alta precisión visual, geométrica y mecánica desarrollada
- Expansión del estudio comparativo llevado a cabo en este trabajo de grado, incluyendo distintos controladores para profundizar los conocimientos sobre la incidencia de distintas alternativas de control moderno en el comportamiento de robots de estructura paralela.
- Realización de estudios cuantitativos acerca de la eficiencia energética del sistema ante distintas condiciones como la incidencia de distintas estrategias de control en el consumo energético o la relación entre la carga útil del sistema y su consumo energético, así como el desarrollo de alternativas de mejora en esta variable.
- Desarrollo, validación e implementación de diferentes órganos terminales para la inclusión en el prototipo. Pudiendo abarcar elementos como: Electroimanes, pinzas, ventosas de succión neumática, grabadores/cortadores láser, soldadores, rociadores, módulos de impresión 3D, etc.
- Estudio sobre las distintas fuerzas presentes en el robot, posiblemente abarcando esfuerzos mecánicos producidos, deformación en los elementos, minimización de presiones, tensiones o torciones no deseadas, etc.
- Evaluación de la incidencia de factores como las vibraciones o las deformaciones en la vida útil del robot, estimación de tiempos de mantenimiento preventivo o mejoras que busquen aportar mayor durabilidad al prototipo.
- Sobre versiones futuras del prototipo, buscar una posible validación comercial del sistema como una plataforma académica, investigativa y/o comercial para instituciones de carácter local, regional o nacional.
- Implementación de sistemas de interacción hombre-máquina para facilitar el control y manipulación del robot.
- Implementación de sistemas de teleoperación capaces de otorgar funciones de manipulación remota del prototipo para el aprendizaje a distancia en temáticas de robótica paralela.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] S. Bennett, "Development of the PID Controller," *Control Systems, IEEE*, vol. 13, págs. 58-60, ene. de 1994. DOI: 10.1109/37.248006.
- [2] F. R. Cortés, *Robótica-control de robots manipuladores*. Alfaomega grupo editor, 2011.
- [3] O. A. V. albán, "Contribution à l'identification et à la commande des robots parallèles," Tesis doct., Université de montpellier II, 2004.
- [4] Z. Pandilov y V. Dukovski, "Several open problems in parallel robotics," *Acta Technica Corvininesis - Bulletin of Engineering*, vol. 7, n.º 1, 2014.
- [5] R. Clavel, "Device for the movement and positioning of an element inspace 1990," Patent 4976 582, dic. de 1990.
- [6] F. Pierrot y O. Company, "H4: a new family of 4-dof parallel robots," en *1999 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics*, IEEE, 1999, págs. 508-513.
- [7] P. Bengoa, A. Zubizarreta, A. Mancisidor, I. Cabanes y E. Portillo, *Control basado en modelo para robots paralelos con sensorización redundante*, 2015.
- [8] T. Huang, Z. Li, M. Li, D. G. Chetwynd y C. M. Gosselin, "Conceptual design and dimensional synthesis of a novel 2-DOF translational parallel robot for pick-and-place operations," *Journal of Mechanical of Design*, vol. 126, n.º 3, págs. 449-455, 2004.
- [9] A. Vivas, P. Poignet, F. Marquet, F. Pierrot y M. Gautier, "Experimental dynamic identification of a fully parallel robot," en *2003 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, IEEE, vol. 3, 2003, págs. 3278-3283.
- [10] R. Cisneros, "Modelo Matemático de un Robot Paralelo de Seis Grados de Libertad," Tesis doct., Universidad de las Américas Puebla, mayo de 2006.
- [11] H.-B. Choi, A. Konno y M. Uchiyama, "Design, implementation, and performance evaluation of a 4-DOF parallel robot," *Robotica*, vol. 28, n.º 1, págs. 107-118, 2010.
- [12] L. M. U. Mantilla y S. A. M. Papagayo, "Diseño e implementación de una plataforma robótica tipo delta," Tesis doct., Universidad militar nueva granada, 2012.
- [13] C. A. P. Cortés, E. M. Oviedo y P. F. C. Herrera, "Optimización dimensional de un robot paralelo tipo delta basado en el menor consumo de energia," *Ciencia e Ingenieria Neogranadina*, vol. 21, n.º 1, pág. 5, 2011.

-
- [14] F. Pierrot, F. Marquet, O. Company y T. Gil, "H4 parallel robot: modeling, design and preliminary experiments," en *Proceedings 2001 ICRA. IEEE International Conference on Robotics and Automation*, IEEE, vol. 4, 2001, págs. 3256-3261.
- [15] A. Vivas y P. Poignet, "Model based predictive control of a fully parallel robot," *IFAC Proceedings Volumes*, vol. 36, n.º 17, págs. 253-258, 2003.
- [16] M. Pedraza, P. Cárdenas, F. Rodríguez y E. Yime, "Aproximación al diseño de robots paralelos, análisis de caso del robot delta," *Memorias*, vol. 0, n.º 0, 2015. dirección: <https://revistas.eia.edu.co/index.php/mem/article/view/833>.
- [17] J.-P. Merlet, *Parallel robots*. Springer Science y Business Media, 2006, vol. 128.
- [18] T. Sakai, K. Harada, S. Tanaka, T. Ueta, Y. Noda, N. Sugita y M. Mitsuishi, "Design and development of miniature parallel robot for eye surgery," en *36th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society*, IEEE, 2014, págs. 371-374.
- [19] C. U. de Navarra, *Vitrectomía*, 2020. dirección: <https://www.cun.es/diccionario-medico/terminos/vitrectomia>.
- [20] M. Malosio, S. P. Negri, N. Pedrocchi, F. Vicentini, M. Caimmi y L. M. Tosatti, "A spherical parallel three degrees-of-freedom robot for ankle-foot neuro-rehabilitation," en *2012 Annual International conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society*, IEEE, 2012, págs. 3356-3359.
- [21] I. Bonev, D. Chablat y P. Wenger, "Working and assembly modes of the Agile Eye," en *Proceedings 2006 IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2006. ICRA 2006.*, jun. de 2006, págs. 2317-2322. DOI: 10.1109/ROBOT.2006.1642048.
- [22] F. Patanè y P. Cappa, "A 3-DOF parallel robot with spherical motion for the rehabilitation and evaluation of balance performance," *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, vol. 19, n.º 2, págs. 157-166, 2010.
- [23] H. D. Taghirad, *Parallel robots: mechanics and control*. CRC press, 2013.
- [24] Omron, *Quattro*, 2019. dirección: <https://automation.omron.com/es/us/products/family/Quattro>.
- [25] PentaRobotic, *Veloce*, 2019. dirección: <https://pentarobotics.com/products/#brochure>.
- [26] V. Nabat, M. de la O Rodriguez, O. Company, S. Krut y F. Pierrot, "Par4: very high speed parallel robot for pick-and-place," en *2005 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, IEEE, 2005, págs. 553-558.
- [27] Omron, *Sysmac delta*, 2020. dirección: <https://automation.omron.com/en/ca/products/family/Sysmac%20Delta>.
- [28] M. Díaz-Rodríguez, H. Quintero-Riaza, A. Mejia, G. Olguin, C. Mesa, M. Herrera-López y G. Peña, "Aplicaciones de los Robots Paralelos," en. Universidad Tecnológica de Perrerira, 2018, págs. 21-38, ISBN: 978-958-722-317-0.
- [29] F. Xie, X.-J. Liu, Z. You y J. Wang, "Type synthesis of 2T1R-type parallel kinematic mechanisms and the application in manufacturing," *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, vol. 30, n.º 1, págs. 1-10, 2014.
- [30] E. de Jesús Cortés, E. Rodríguez y C. Peña, "Desarrollo de un robot paralelo 5R para la impresión en 3D," *Memorias*, 2015.
- [31] DeltaX, Página Web, 2019. dirección: <https://www.deltaxrobot.com>.

- [32] K. D. Barón y C. B. Pinilla, “Generalidades de robots paralelos,” *Visión electrónica*, n.º 1, pág. 7, 2016.
- [33] M. Farhadmanesh, E. Abedloo y A. Molaei, “Dynamics formulation and motion control of a planar parallel manipulator,” en *2015 3rd RSI International Conference on Robotics and Mechatronics (ICROM)*, IEEE, 2015, págs. 205-209.
- [34] J. Wu y Z. Yin, “A novel 4-DOF parallel manipulator H4,” en *Parallel manipulators, towards new applications*, intechopen, 2008. dirección: https://www.intechopen.com/books/parallel_manipulators_towards_new_applications/a_novel_4-dof_parallel_manipulator_h4.
- [35] A. O. Baturone, *Robótica manipuladores y robots móviles*. Marcombo, 2001, pág. 2.
- [36] R. I. Madrigal y E. V. Idiarte, *Robots industriales manipuladores*. Marcombo, 2002, pág. 1.
- [37] I. O. Caparroso, O. Avilés y J. H. Bello, “Una introducción a la robótica industrial,” *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, vol. 8, págs. 53-67, jun. de 1999. dirección: <https://revistas.unimilitar.edu.co/index.php/rcin/article/view/1410>.
- [38] C. E. de Automática, *El Libro Blanco de la Robótica en España*, 2011.
- [39] A. Barrientos, L. F. Peñín, C. Balaguer y R. Aracil, *Fundamentos de robótica*. McGRAW-HILL, 2007.
- [40] T. M. Knasel, “Mobile robotics—State of the art review,” *Robotics*, vol. 2, n.º 2, págs. 149-155, 1986.
- [41] ISO, *ISO 8373:2012*, 2012. dirección: <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:8373:ed-2:v1:en>.
- [42] A. J. Kurdila y P. Ben-Tzvi, *Dynamics and control of robotic systems*. Wiley-Blackwell, 2020.
- [43] D.-E. Vila Rosado y J. Domínguez-López, “El arte de diseñar robots manipuladores,” *Komputer Sapiens*, vol. 7, págs. 17-23, sep. de 2015.
- [44] I. N. Española, *UNE-EN ISO 8373:1998*, 1998. dirección: <https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma/?c=N0013713>.
- [45] H. D. Taghirad, *Parallel robots: mechanics and control*. CRC press, 2013.
- [46] S. Briot y W. Khalil, *Dynamics of Parallel Robots*. Springer, 2015.
- [47] Y. Jin, H. Chanal y F. Paccot, “Handbook of Manufacturing Engineering and Technology,” en, A. Y. C. Nee, ed. Springer London, 2015.
- [48] R. Clavel, *Conception d’un robot parallèle rapide à 4 degrés de liberté*, Lausanne, 1991. DOI: 10.5075/epfl-thesis-925. dirección: <http://infoscience.epfl.ch/record/31403>.
- [49] O. A. Vivas Albán, *Diseño y control de robots industriales: teoría y práctica*. elaleph, 2010.
- [50] A. A. Iturriagagoitia, *Teoría de máquinas*. Tecnun – Universidad de Navarra, 2014, págs. 2-22.
- [51] A. Hernández, *Cinemática de mecanismos; análisis y diseño*. Editorial síntesis, 2004, págs. 37-40.
- [52] A. J. N. Quijorna, *Elementos de máquinas*. Universidad de Castilla-La Mancha, 2007, págs. 20-21.
- [53] F. P. Beer, E. R. Johnston y P. J. Cornwell, *Mecánica vectorial para ingenieros: Dinámica*. The McGraw-Hill, 2010.

-
- [54] R. Kelly y V. Santibáñez, *Control de movimiento de robots manipuladores*. Pearson educación, 2003.
- [55] J. M. L. Sánchez, “Control de posición y seguimiento de trayectorias para un robot neumático de estructura paralela,” Tesis doct., Universidad politécnica de cartagena, 2012.
- [56] F. Reyes, *Robótica-Control de robots manipuladores*. Alfaomega grupo editor, 2011.
- [57] H. B. Choi, O. Company, F. Pierrot, A. Konno, T. Shibukawa y M. Uchiyama, “Design and control of a novel 4-DOFs parallel robot H4,” en *2003 IEEE International Conference on Robotics and Automation (Cat. No.03CH37422)*, vol. 1, 2003, 1185-1190 vol.1.
- [58] E. Ottaviano y M. Ceccarelli, *Optimal design of capaman (cassino parallel manipulator) with prescribed workspace*, 2000.
- [59] R. Stamper, L.-W. Tsai y G. Walsh, “Optimization of a three DOF translational platform for well-conditioned workspace,” en *Proceedings of International Conference on Robotics and Automation*, vol. 4, 1997, 3250-3255 vol.4. DOI: 10.1109/ROBOT.1997.606784.
- [60] O. Company, F. Marquet y F. Pierrot, “A new high-speed 4-DOF parallel robot synthesis and modeling issues,” *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, vol. 19, n.º 3, págs. 411-420, 2003. DOI: 10.1109/TRA.2003.810232.
- [61] L. Li, Q. Sun, C. Bellehumeur y P. Gu, “Composite Modeling and Analysis for Fabrication of FDM Prototypes with Locally Controlled Properties,” *Journal of Manufacturing Processes*, vol. 4, n.º 2, págs. 129-141, 2002, ISSN: 1526-6125. DOI: [https://doi.org/10.1016/S1526-6125\(02\)70139-4](https://doi.org/10.1016/S1526-6125(02)70139-4). dirección: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1526612502701394>.
- [62] D. Systèmes, *Solidworks 2019*, 2019. dirección: <https://www.solidworks.com/es/solution/organization-type/academia>.
- [63] Arduino, Página Web, 2021. dirección: <https://store.arduino.cc/usa/>.
- [64] W. Elmenreich, Página Web, 2011. dirección: <https://netwerkt.wordpress.com/2011/01/02/an-alternative-uart-that-does-not-need-special-quartz-frequencies/>.
- [65] MathWorks, Página Web, 2021. dirección: <https://la.mathworks.com/discovery/arduino-programming-matlab-simulink.html>.
- [66] P. Semiconductors, “The I2C-bus specification,” *Philips Semiconductors*, vol. 9397, n.º 750, pág. 00954, 2000.
- [67] MathWorks, *Simulink Getting Started Guide*, MathWorks.
- [68] E. Rohmer, S. P. N. Singh y M. Freese, “CoppeliaSim (formerly V-REP): a Versatile and Scalable Robot Simulation Framework,” en *Proc. of The International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, www.coppeliarobotics.com, 2013.
- [69] R. Merino López, “Creación de modelo URDF del robot manfred,” Tesis de mtría., Universidad carlos III de Madrid, 2014.

ANEXO A

DISEÑO Y FABRICACIÓN DE PIEZAS PARA EL ROBOT H4.

En el presente anexo se documenta el proceso de diseño y fabricación de las piezas producidas a medida: El alma de los antebrazos, los antebrazos, los soportes de los antebrazos, los soportes del motor, los acoples en T y la base móvil del robot que se integran en el ensamblaje como se detalla a en las figuras A.1 y A.2.

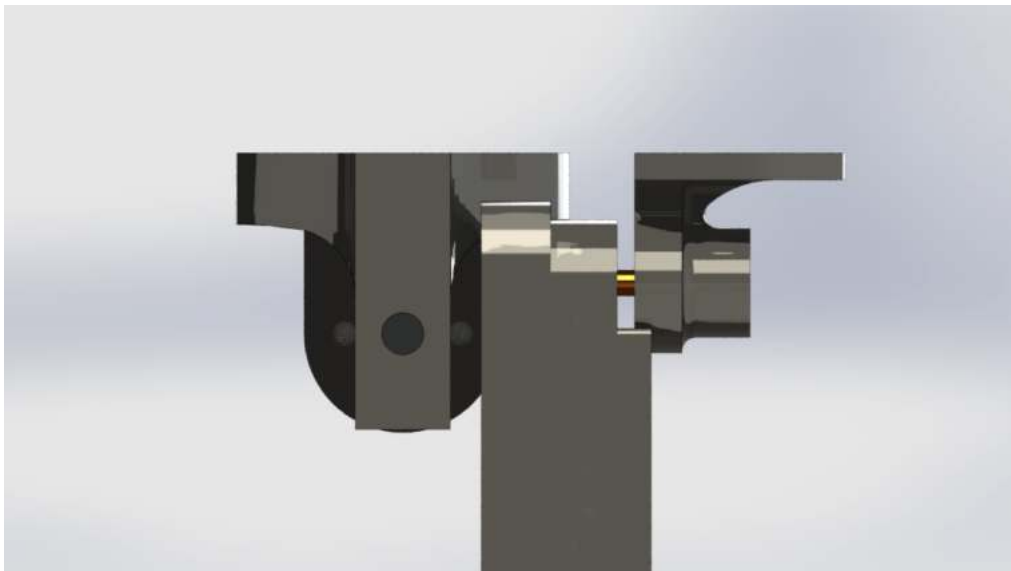


Figura A.1: Detalle del robot - A.

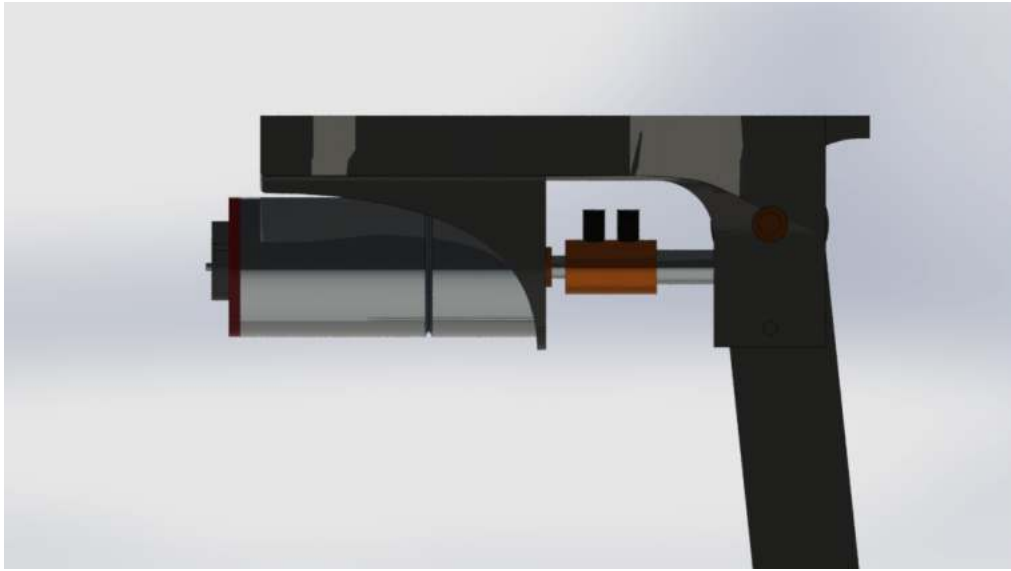


Figura A.2: Detalle del robot - B.

A.1. Alma para el antebrazo

La pieza se compone de un cuerpo concéntrico que se aloja a presión al interior del cuerpo del antebrazo y en el centro del rodamiento de soporte. En el extremo más ancho contiene una perforación para alojar el eje del motor, así como espacio para anclaje del mismo mediante cuña y tornillo prisionero, en el extremo más delgado una punta en forma de pala que se anclará al sensor.

Debido a las necesidades mecánicas y de fabricación el material usado es bronce y se mecanizó mediante torno

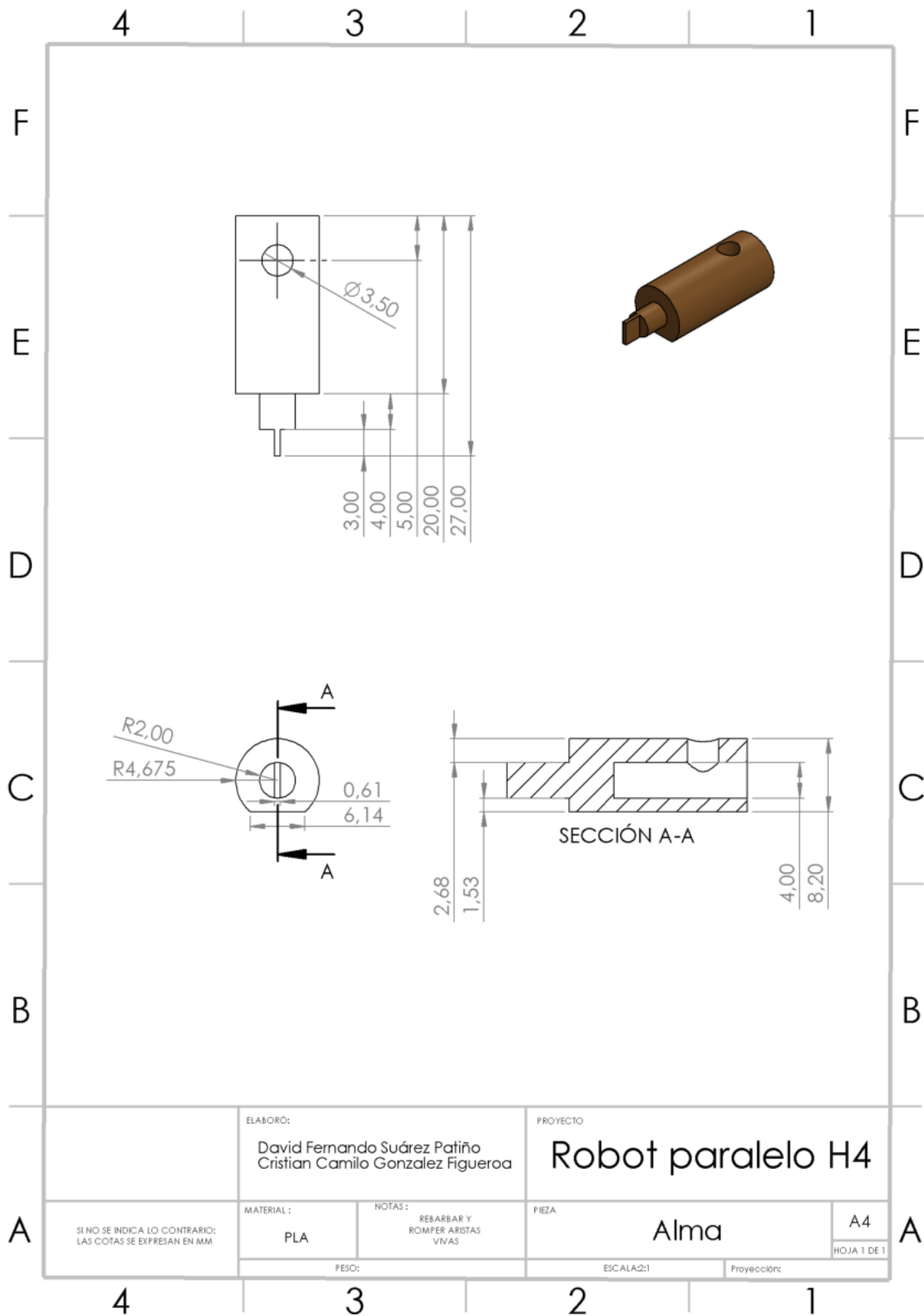


Figura A.3: Plano del alma del antebrazo.

A.2. Antebrazos

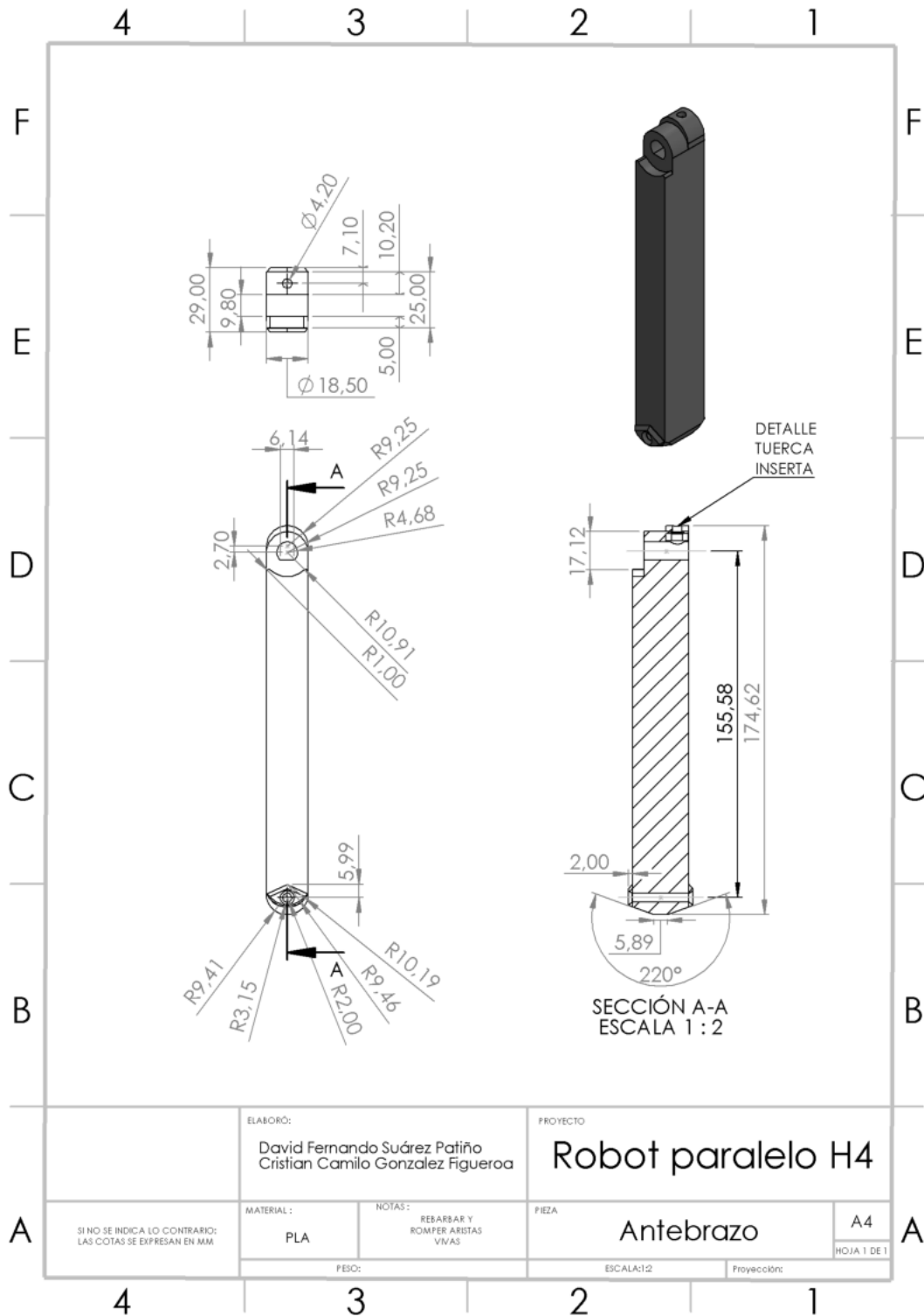


Figura A.4: Plano del antebrazo.

La pieza constituye un cuerpo estructuralmente sólido fabricado mediante impresión 3D, en el extremo superior aloja el alma al tiempo que permite la sujeción del tornillo prisionero de la misma mediante la inserción de una tuerca embebida y se adapta a la forma del soporte del antebrazo para permitir la rotación en el mínimo espacio posible. En el extremo inferior cuenta con espacio para el tornillo pasante que conecta hacia el resto de las cadenas cinemáticas y incluye cunas para los separadores usados a modo que se minimice la presión distribuyéndola en mayor superficie.

Las características de rendimiento del material empleado son:

- Tensión rotura: 21 kpsi
- Módulo de Tensión 500 kpsi
- Resistencia al Impacto: 13.1 KJ/m²
- Resistencia a la Flexión: 89.2 MPa

Los parámetros de impresión utilizados fueron:

- Altura de capa: 0.2mm
- Grosor de pared: 1.4mm
- Recuento de líneas de pared: 3
- Grosor superior/inferior: 1mm
- Densidad de relleno: 15 %
- Patrón de relleno: Cúbico

A.3. Soporte del antebrazo

Sirve de punto de apoyo para el antebrazo permitiendo el movimiento rotacional a través de un rodamiento inserto a presión y de punto de apoyo para el sensor de posición del sistema en la sección posterior. Se ancla a la base rígida a través de 3 tornillos.

Comparte características de material y parámetros de impresión con el antebrazo a excepción de la altura de capa de 0.16 para mayor resolución de construcción.

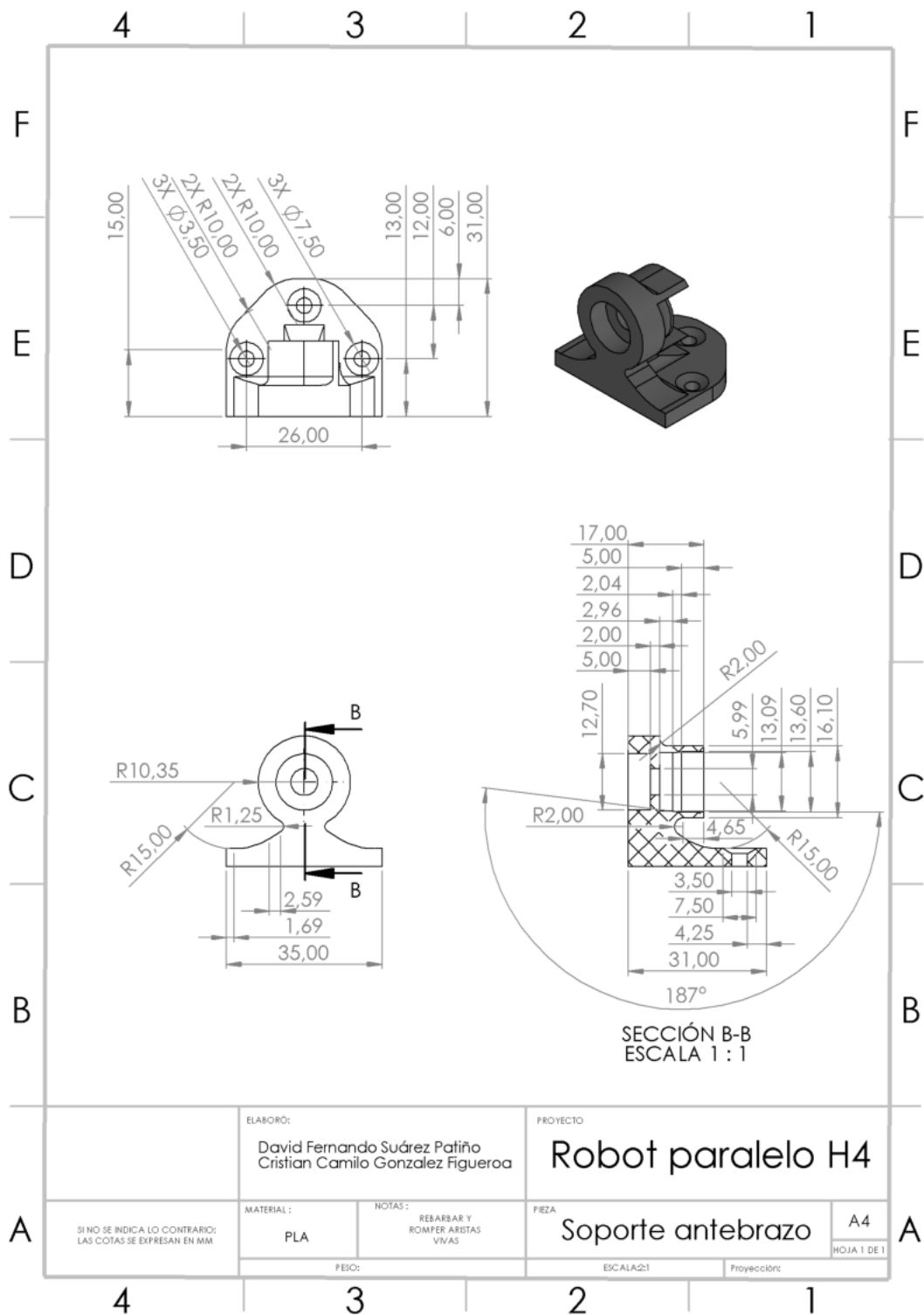


Figura A.5: Plano del soporte del antebrazo.

A.4. Soporte del motor

Brinda anclaje al motor sobre la base rígida, concentricidad del eje del motor con el antebrazo, el soporte del antebrazo y el potenciómetro. Fabricado en impresión 3D con características y parámetros similares a los anteriores a excepción del porcentaje de relleno que sube al 50 Para mayor rigidez ante torque y ante el esfuerzo de los tornillos.

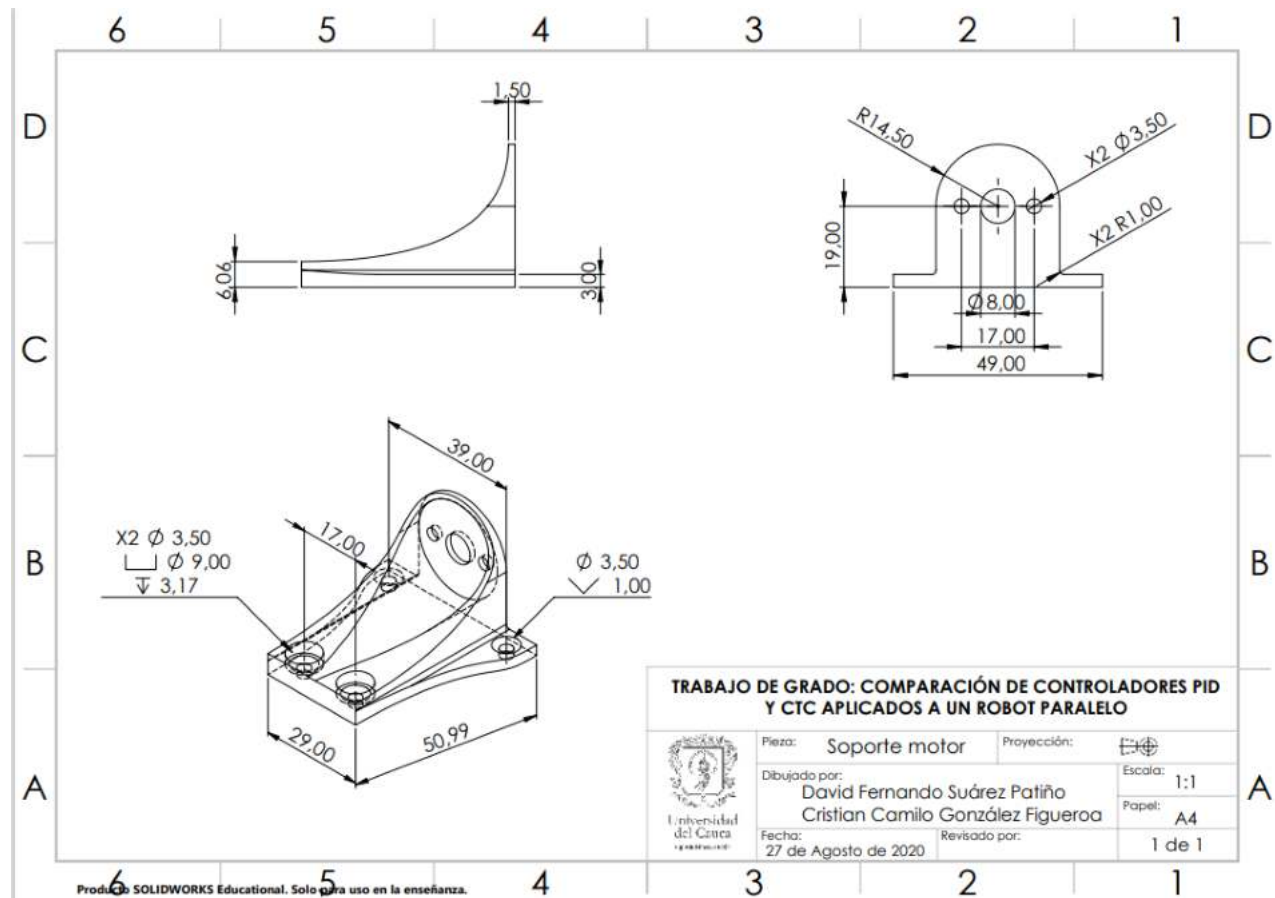


Figura A.6: Plano del soporte de motor.

A.5. Acoples en T

la pieza constituye el punto final de las cadenas cinemáticas, interseca el último tornillo pasante con dos tornillos axiales que conectan el eje longitudinal de las cadenas con la base móvil. Fabricado en impresión 3D con características y parámetros similares a los anteriores.

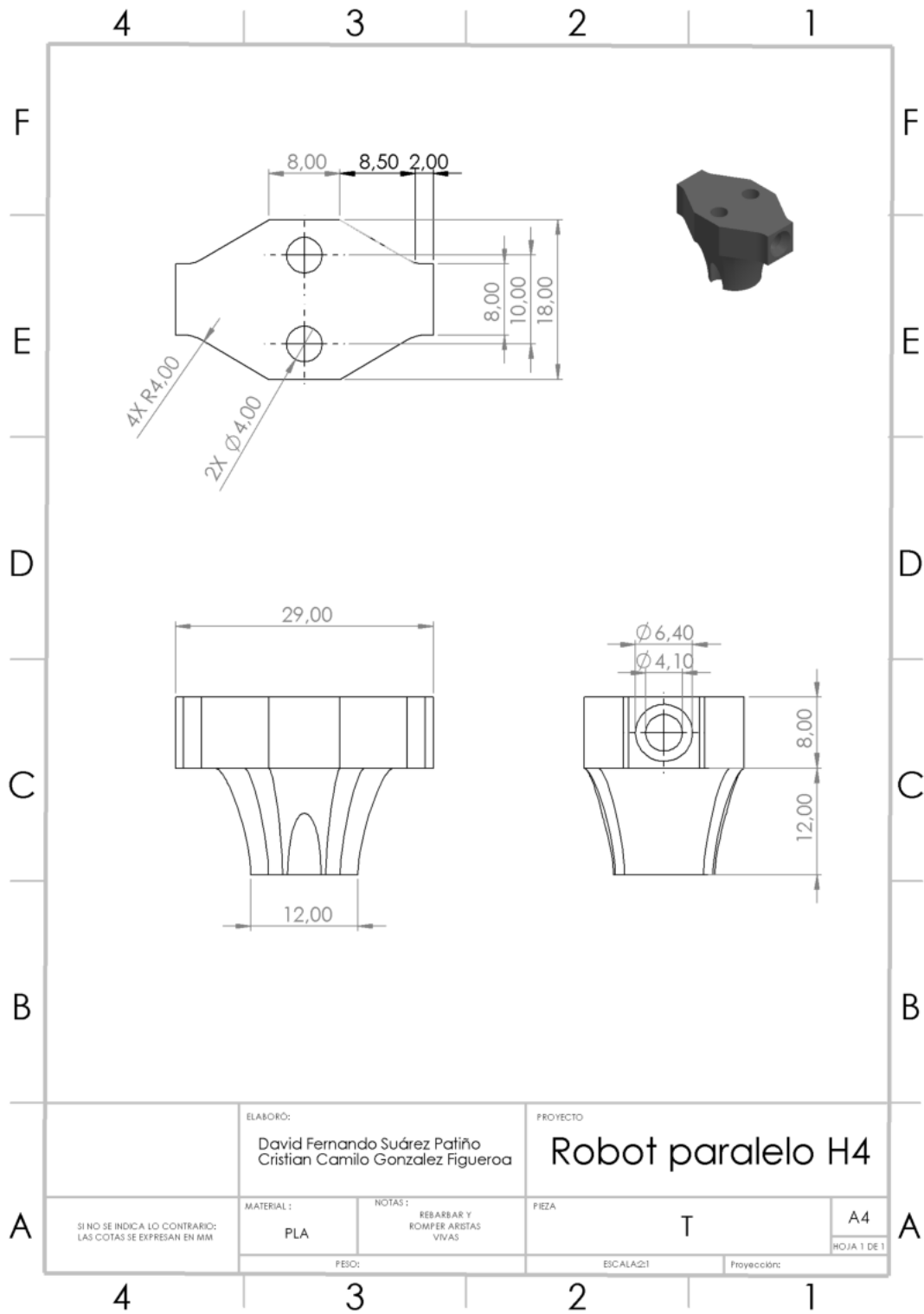


Figura A.7: Plano de acople en T.

A.6. Base móvil

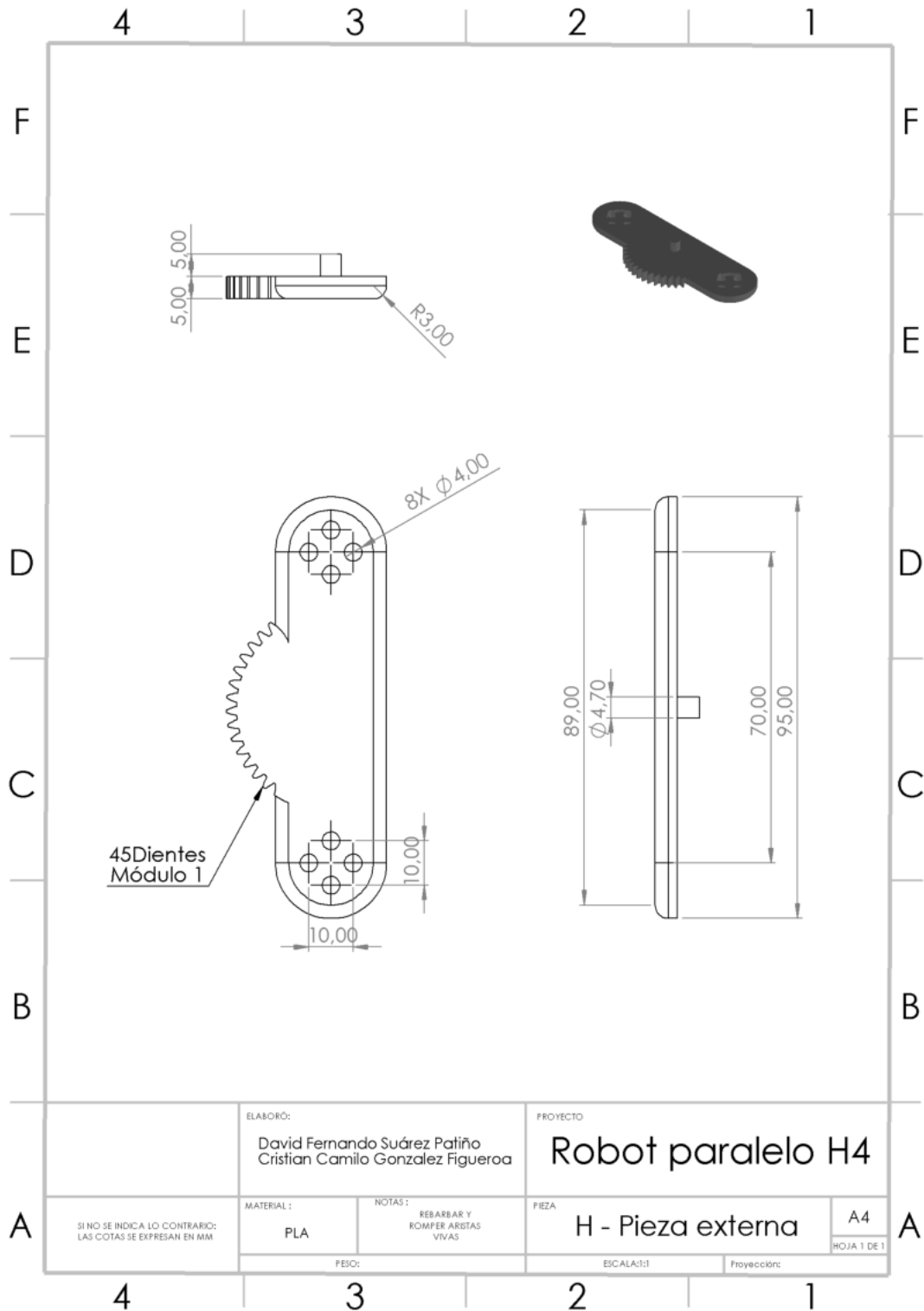


Figura A.8: Plano de la base móvil - Pieza externa.

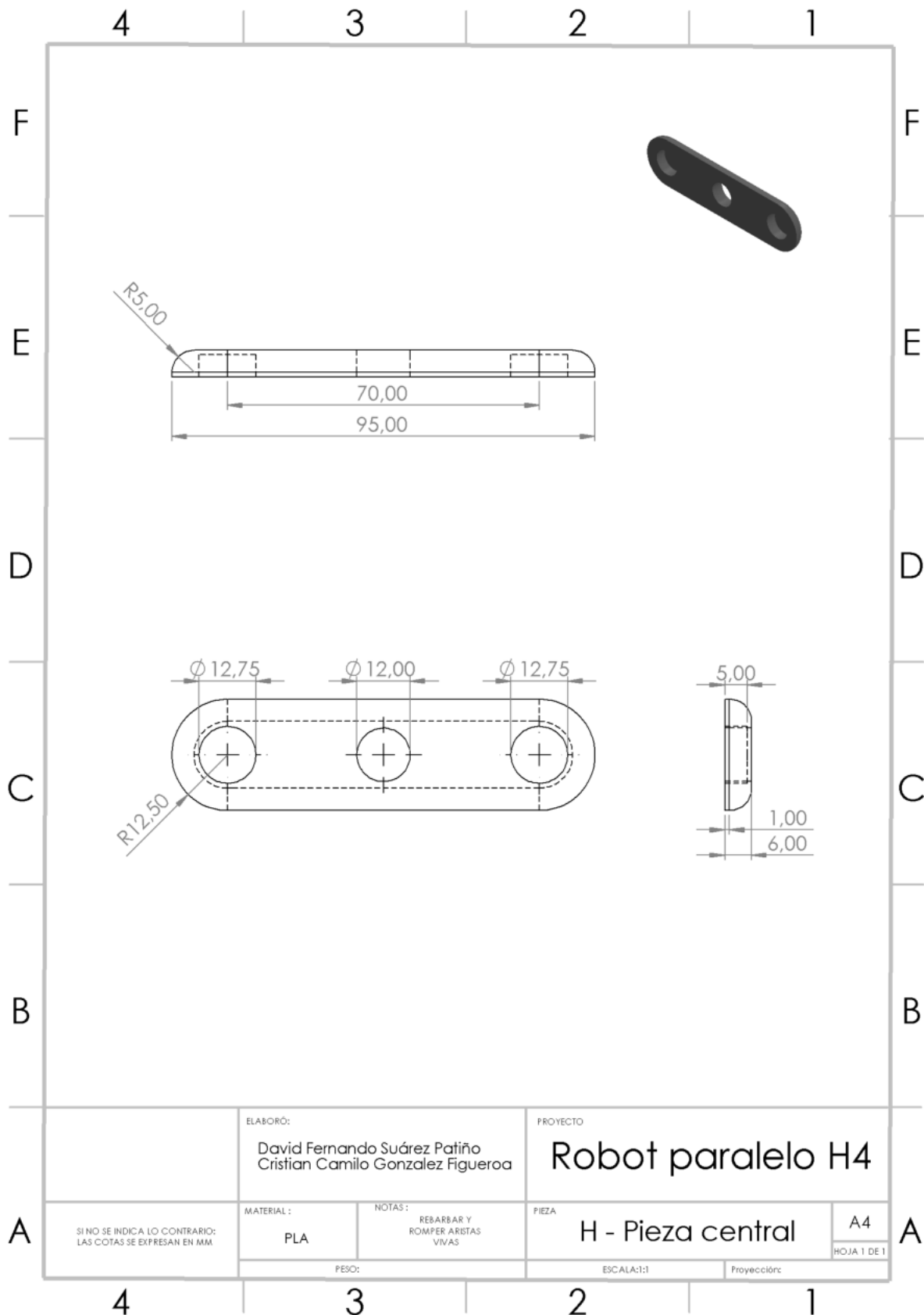


Figura A.9: Plano de la base móvil - Pieza central.

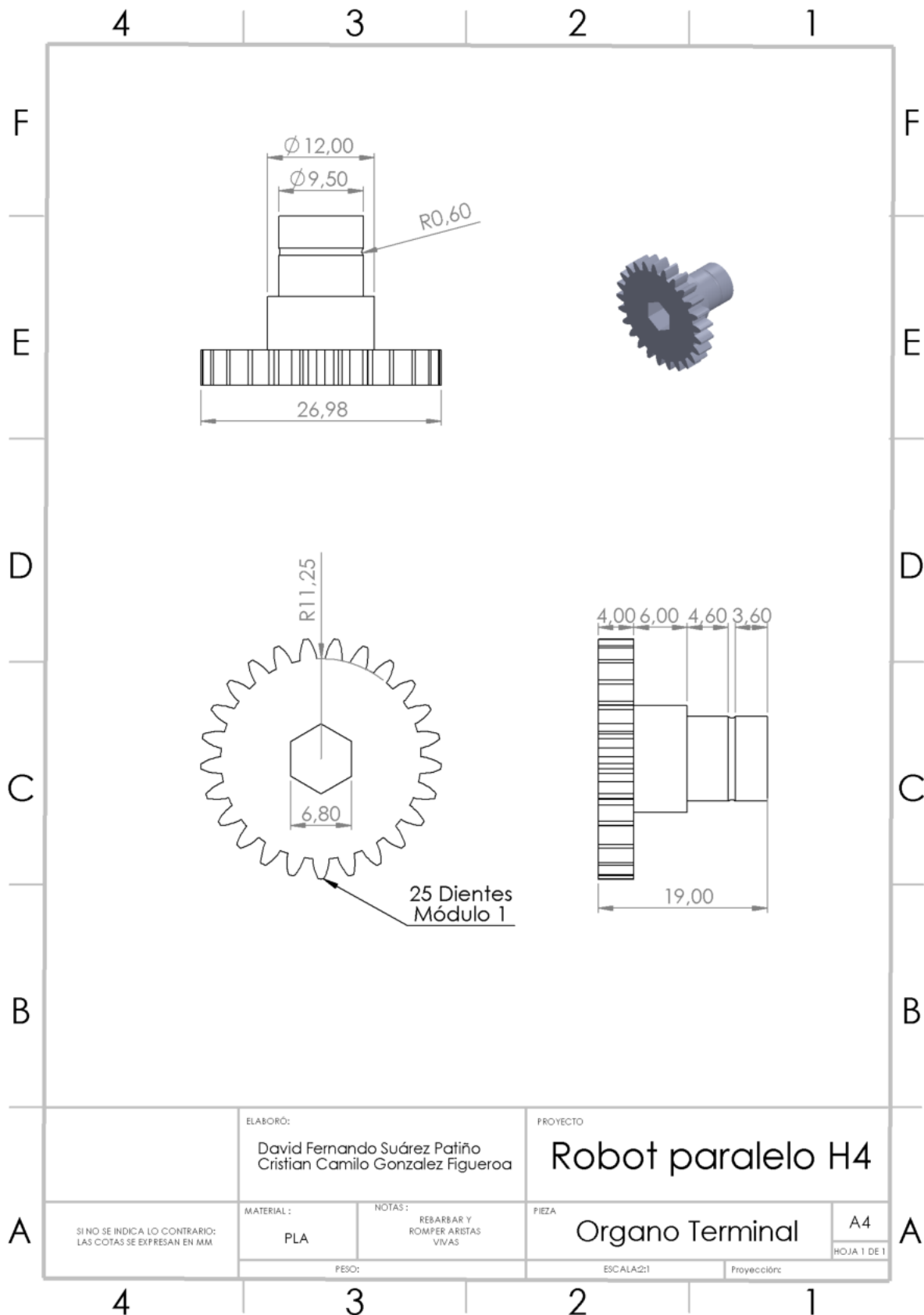


Figura A.10: Plano de la base móvil - Órgano terminal.

Se compone de cuatro piezas separadas: Dos secciones externas en simetría, una pieza central y un órgano terminal.

Las piezas externas reciben los acoples en T permitiendo seleccionar la configuración de cada una de ellas en 0, 90, 180 o 270 grados y se unen a la pieza central a través de rodamientos.

La pieza central garantiza la unión entre todas las demás piezas y la distancia entre centros de los puntos de unión para cumplir con los parámetros geométricos del robot.

El órgano terminal además de actuar como acople para distintos efectores finales cuenta con piñonería para garantizar la relación paralela entre las dos piezas externas y aplicar el cuarto grado de libertad del robot

ANEXO B

SIMULACIÓN COPPELIASIM Y AJUSTE DE MODELOS GEOMÉTRICOS

Para tener un eje de comparación que permita ajustar los modelos geométricos tanto inverso como directo del prototipo, se realizó una simulación en CoppeliaSim mediante el complemento de cinemática inversa proporcionado por dicho software. Por tanto, en este apartado se describe los diferentes pasos realizados por la simulación y la comparación de los modelos geométricos con respecto a los valores obtenidos en CoppeliaSim.

B.1. Generalidades CoppeliaSim

El software CooppeliaSim [68] es un software versátil de código abierto y gratuito con diferentes herramientas que permite la simulación de robots y de entornos industriales. Además es multi-plataforma con la posibilidad de trabajar con seis diferentes lenguajes de programación (C / C ++, Python, Java, Lua, Matlab y Octave), cuenta con diferentes motores físicos, solucionadores de cinemática completa, simulación de sensores, simulación de cámaras de visión artificial, entre otros. Posicionándose como una herramienta software de gran utilidad para la simulación de diferentes estructuras robóticas.

Adicionalmente CoppeliaSim cuenta con diferentes objetos que se pueden añadir a la escena de simulación y recrear de forma mas realista del comportamiento esperado en la simulación de diferentes robots como: Formas, juntas, sensores de proximidad, visión maquina, etc.

B.2. Importación de mallas

Para la simulación del prototipo del robot H4 en el software de CoppeliaSim, se hizo uso de los modelos 3D diseñados en el Software de diseño 3D CAD Solidworks[62]. Fue necesario la importación de los modelos al software de Coppeliasim por medio del formato URDF (*Universal Robot Description Format*). Este formato es una especificación XML para la descripción de un robot por medio de un conjunto de elementos de eslabones y de un conjunto de elementos de unión además de una representación visual del robot [69].

El formato URDF es compatible para realizar operaciones de importación usando el complemento destinado a trabajar con Solidworks. De esta forma se obtuvieron las mallas rígidas compuestas de caras triangulares llamadas (*shapes*) o formas que permiten visualizar el prototipo de robot H4 en CoppeliaSim.

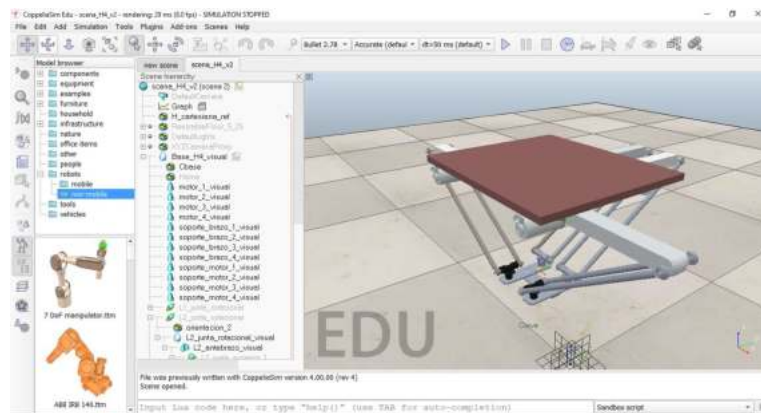


Figura B.1: Importación de mallas a CoppeliaSim.

B.3. Ubicación de juntas

Dentro de los objetos disponibles en CoppeliaSim, las juntas pueden ser tanto juntas pasivas como actuadores y se clasifican en: prismáticas, esféricas, angulares y de tornillo. Ver figura B.2. Las juntas usadas para la simulación fueron angulares, esféricas y prismáticas. Como se muestra en la figura B.3, fue necesario posicionar cada junta y adicionalmente se configuró sus propiedades para trabajar con el módulo de cinemática inversa.

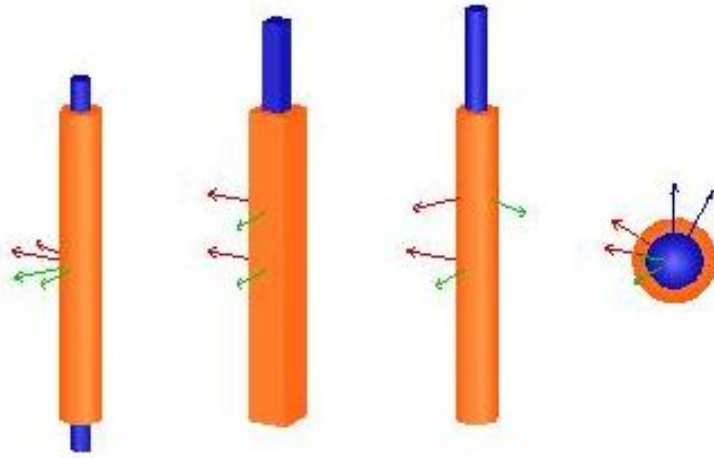


Figura B.2: junta angular, junta prismática, tornillo y junta esférica [68]

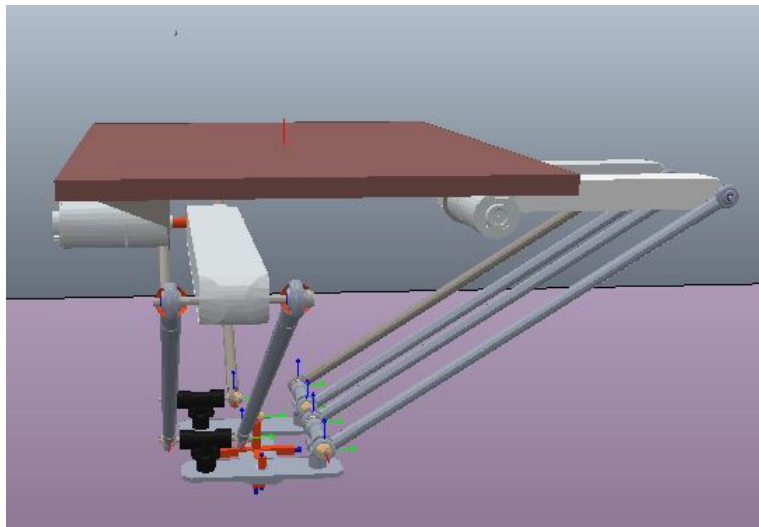


Figura B.3: Juntas robot H4 Coppeliasim.

B.4. Jerarquía de Objetos

Para obtener una simulación adecuada correspondiente al movimiento del robot es necesario establecer una jerarquía entre las diferentes formas importadas siguiendo una estructura árbol compuesta por objetos hijos que dependen de objetos padres. En la figura B.4 se puede observar la jerarquía establecida para una de las cadenas cinemáticas que componen al prototipo de robot H4, esto se hizo consecutivamente para cada una de las formas importadas que componen el modelo del robot, por tanto, quedaron jerarquizados de forma que cada cadena cinemática del robot fuera independiente formando una jerarquía de robot tipo serie. Además se estableció

una jerarquía adicional para la góndola o base móvil con el fin de añadir “relaciones de posición” entre este y cada cadena cinemática abierta formada por medio de objetos dummy.

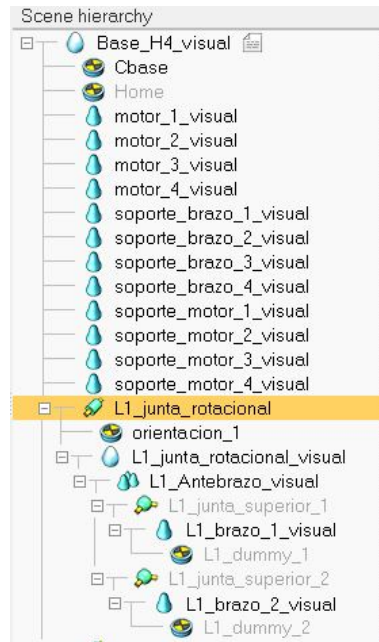


Figura B.4: Jerarquía de objetos en Coppeliasim.

B.5. Simulación y comparación de datos

Una vez importado y organizado el modelo 3D, se procedió a establecer una comunicación entre Matlab y Coppeliasim a través del uso de APIs remotas para comparar los ángulos obtenidos por el modelo geométrico inverso simulado en Simulink y los datos de los ángulos obtenidos por medio del módulo de cálculo de cinemática inversa (*IK*) de Coppeliasim. El error cuadrático obtenido una vez ajustado los parámetros en los modelos geométricos se visualizan en la figura B.5.

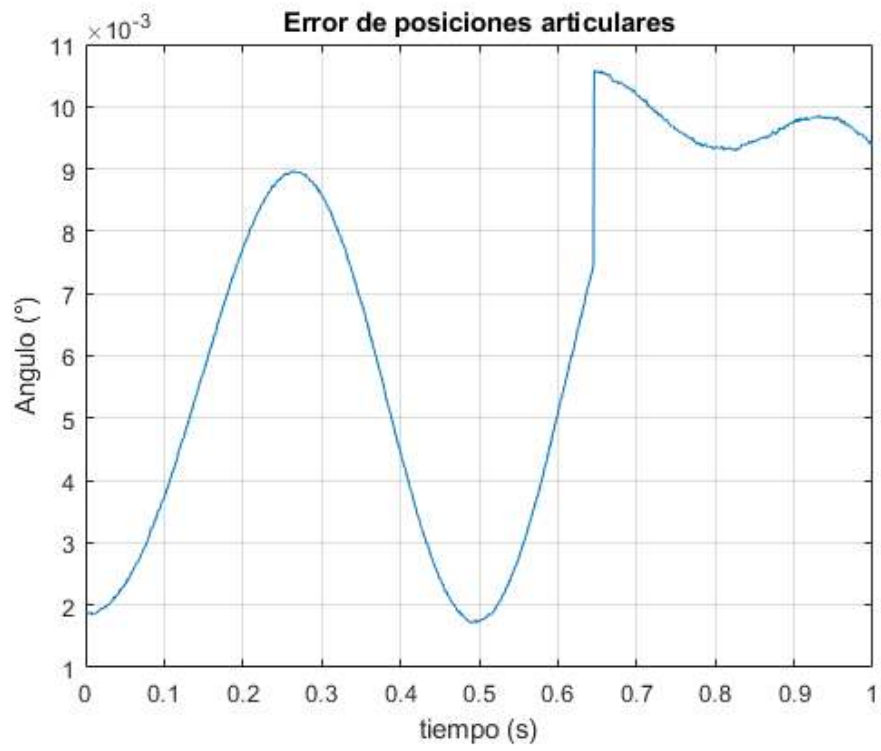


Figura B.5: Error de ángulos entre Matlab y CoppeliaSim